



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**SUPERABSORBENTY S ŘÍZENÝM UVOLŇOVÁNÍM
NUTRIENTŮ**

SUPERABSORBENTS WITH CONTROLLED RELEASE OF NUTRIENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petra Závodská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martina Klučáková, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1416/2018 Akademický rok: 2018/19
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Petra Závodská**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie pro medicínské aplikace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Martina Klučáková, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Superabsorbenty s řízeným uvolňováním nutrientů

Zadání bakalářské práce:

1. Seznámit se s problematikou superabsorbentů s důrazem na materiály s inkorporovanými nutrieny.
2. Seznámit se s možnostmi studia jejich vlastností a chování.
3. Na základě poznatků získaných v předchozích bodech navrhnout metody vhodné ke studiu a provést experimenty.
4. Zhodnotit výsledky experimentů a navrhnout další postup.

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.5.2019:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Petra Závodská
student(ka)

prof. Ing. Martina Klučáková, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřená na studium superabsorpčních polymerů a jejich schopnosti postupného uvolňování nutrientů. Tyto polymery dokáží pojmout obrovské množství vody, až stonásobek původní hmotnosti. V kombinaci s nutrienty, především dusíku, fosforu, draslíku a lignohumátu, tvoří účinné hnojivo. Díky tomuto faktu narůstá možnost využití v zemědělství. Proto byly provedeny experimenty, které zkoumají schopnost superabsorpčního polymeru pojmout vodu, tedy bylo změřeno botnání. Dále byly provedeny experimenty, které souvisejí s uvolňováním nutrientů. Práce je tedy zaměřena na studium charakteristiky superabsorpčních polymerů, které mohou následně najít využití v zemědělství.

ABSTRACT

This thesis is focused on the study of superabsorbent polymers and their ability of control release of nutrients. These polymers can absorb huge amount of water, up to hundredth times more than the original weight is. In combination with nutrients, especially nitrogen, phosphorus, potassium and lignohumate, they make effective fertilizer. Due to this fact, the possibility of use in agriculture is increasing. Therefore, experiments that are researching the ability of containing the water were performed, the swelling capacity was measured. Experiments that are related to control release of nutrients were performed next. Therefore, this thesis is focused on the study of superabsorbent polymer characterisation, that can be used in agriculture.

KLÍČOVÁ SLOVA

Superabsorpční polymery, nutrienty, uvolňování, gely

KEY WORDS

Superabsorbent polymers, nutrients, release, gels

ZÁVODSKÁ, Petra. *Superabsorbenty s řízeným uvolňováním nutrientů* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113547>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Martina Klučáková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům je se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěla velmi poděkovat mé vedoucí prof. Ing. Martině Klučákové, Ph.D. za poskytnutí cenných rad, připomínek a veškerou pomoc při zpracování této práce, a hlavně pak při měření. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Marcele Smilkové za pomoc při přípravě superabsorpčních polymerů a Ing. Vojtěchu Enevovi, Ph.D. a Ing. Jaromíru Pořízkovi, Ph.D. za jejich pomoc a rady, které mi pomohly při zpracování bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat Sylvě Mihočové a Leoně Kubíkové za veškerou jejich pomoc.

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 7 |
| 2 | Teoretická část | 8 |
| 2.1 | Gely | 8 |
| 2.1.1 | Vlastnosti gelů | 8 |
| 2.1.2 | Rozdělení gelů | 9 |
| 2.2 | Polyakryláty | 10 |
| 2.3 | Superabsorbenty | 11 |
| 2.3.1 | Využití superabsorpčních polymerů | 12 |
| 2.3.2 | Druhy superabsorbentů využívané v zemědělství | 12 |
| 2.3.3 | Uvolňování nutrientů | 13 |
| 2.4 | Nutrienty využívané ve spojení se superabsorbenty | 14 |
| 2.4.1 | Anorganické nutrienty | 14 |
| 2.4.2 | Organické nutrienty | 15 |
| 3 | Současný stav řešené problematiky | 17 |
| 4 | Experimentální část | 21 |
| 4.1 | Použité chemikálie | 21 |
| 4.2 | Použité přístroje | 21 |
| 4.3 | Příprava superabsorbentů | 22 |
| 4.4 | Charakteristika různých druhů lignohumátů | 23 |
| 4.4.1 | Měření pH, vodivosti a UV–VIS spektra | 23 |
| 4.5 | Charakteristika superabsorbčních polymerů | 23 |
| 4.5.1 | Botnání | 23 |
| 4.5.2 | Měření pH a vodivosti | 23 |
| 4.5.3 | Měření UV–VIS spektra | 24 |
| 4.5.4 | ICP–OES a iontová chromatografie (IC) | 24 |
| 5 | Výsledky a diskuze | 25 |
| 5.1 | Charakteristika lignohumátů | 25 |
| 5.1.1 | Měření pH a vodivosti roztoků lignohumátů | 25 |
| 5.1.2 | Elementránní analýza | 25 |
| 5.1.3 | Měření UV–VIS roztoků lignohumátů | 26 |
| 5.1.4 | FT–IR | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.2 | Charakteristika superabsorpčních polymerů | 27 |
| 5.2.1 | Botnání | 27 |
| 5.2.2 | Vodivost a pH..... | 29 |
| 5.2.3 | UV–VIS..... | 31 |
| 5.2.4 | ICP–OES | 32 |
| 5.2.5 | Iontová chromatografie | 35 |
| 6 | Závěr | 38 |
| 7 | Seznam Literatury..... | 39 |
| 8 | Seznam použitých zkratk..... | 43 |

1 ÚVOD

Superabsorpční polymery neboli superabsorbenty jsou z chemického hlediska nejčastěji makromolekulární látky na bázi kyseliny akrylové, které disponují obrovskou absorpční schopností. Pro tuto schopnost je jejich využití velmi široké, konkrétně je můžeme najít v hygienických potřebách, jako jsou například pleny.

Cílem této práce je posunutí využití těchto polymerů do oblasti zemědělství, a to konkrétně využití jako nosičů pro rostlinné nutrienty. Nutrienty mohou být anorganické či organické povahy. Anorganickou složku zastupují především prvky, kdy zásadní roli v životě rostliny hrají dusík, fosfor a draslík. Jako organická složka se nejčastěji využívají huminové látky, které slouží pro zlepšování kvality půdy.

Využití v zemědělství souvisí především se schopností postupného neboli řízeného uvolňování právě zmíněných nutrientů. Podmínky pro pěstování v určitých světových oblastech jsou poměrně náročné, konkrétně se jedná o suché oblasti s nedostatkem vody. Tento problém by mohl být řešen právě použitím superabsorpčních polymerů, které jsou schopné pojmout obrovské množství vody, kterou následně postupně uvolňují.

V této práci tedy byla nejprve zjišťována botnací charakteristika, tedy množství vody, které byly připravené polymery schopny pojmout. Následně byly proměřeny charakteristiky související s uvolňováním nutrientů, konkrétně například pH, vodivost a UV–VIS spektrum.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 GELY

Jedná se o systém, který je tvořen trojrozměrnou sítí. Tato síť tvoří souvislou strukturu, která prochází celým disperzním prostředím, což je prostředí, v němž je rozptýlen disperzní podíl systému. V heterogenních systémech může tvořit samostatnou fázi, v lyofilních koloidech tvoří disperzní podíl společně s disperzním prostředím jednu fázi. Jako lyofilní koloid se označuje homogenní soustava s částicemi o koloidní velikosti (1–1000 nm) [1].

Jako gel si můžeme představit systém, ve kterém je disperzní prostředí v kapalně fázi a označuje se jako lyogel, pokud je disperzním prostředím voda, jedná se o hydrogel. Vysušením lyogelu, tedy odstraněním disperzní fáze, vznikají xerogely, které se stále zahrnují do gelů [1].

Velikost disperzních částic, které se navzájem spojují a tvoří trojrozměrnou síťovitou strukturu gelu, mívají koloidní velikost. Spodní hranicí je 1 nm, tato hodnota souvisí s fyzikálně-chemickou definicí povrchu, podle níž musí být částice velká tak, aby při shlukování atomů bylo možné rozpoznat vnitřní a vnější atomy. Hodnota 1 nm odpovídá agregátu složeného z atomů při nejhustším uspořádání za předpokladu kulovitého tvaru jednotlivých atomů [1].

2.1.1 Vlastnosti gelů

Gely jsou schopné se chovat jako elastická tělesa a odolávat tečnému napětí až do hodnoty kritického napětí. Tato hodnota je závislá především na koncentraci uzlů a na jejich pevnosti, tedy čím větší koncentrace a počet vazeb, tím menší možnost změny struktury makromolekuly [1].

Další vlastností gelů je tzv. *tixotropie*. Tento název označuje možnost převedení gelu pomocí mechanického působení (například protřepání) na sol. Pokud se tento koloidní roztok ponechá stát, začne docházet k obnově jednotlivých vazeb, a nakonec ke gelaci. Tomuto jevu podléhají pouze gely, které mají stejnou pevnost všech uzlů. U gelů s různě pevnými uzly dochází k porušení méně pevných a následná gelace není schopna vytvořit opět gel s původními vlastnostmi [1].

Čerstvé gely nejsou v termodynamické rovnováze, a proto u nich dochází k řadě samovolných jevů. Jedním z nich je *stárnutí*, kdy vzrůstá počet styčných bodů a tím i smrštění síťovité struktury. Následně se vytlačuje kapalina až se odmísí od gelu. Tento jev se nazývá *synereze* [1].

2.1.1.1 Botnání

Jedná se o proces, kdy reverzibilní xerogel pohlcuje kapalinu, nízkomolekulární rozpouštědlo, zvětšuje svůj objem a hmotnost za vzniku lyogelu. Principálně se jedná o rozpouštění, rozpouštědlo difunduje do xerogelu za zvětšení objemu a posunutí fázového rozhraní. Makromolekuly mohou difundovat do rozpouštědla, pouze když dojde ke zrušení asociačních spojení mezi makromolekulami [2][1][2].

Botnání můžeme rozdělit na dva druhy, a to *botnání omezené* a *botnání neomezené*. V případě omezeného botnání se rozpouštění zastaví ve stádiu elastického gelu, při neomezeném botnání dochází k úplnému rozpouštění gelu v nízkomolekulárním rozpouštědle. Podmínky určující jednotlivé druhy botnání jsou například afinita xerogelu k rozpouštědлу, pevnost spojení xerogelu nebo fyzikální podmínky, jako je teplota či tlak [1].

Kvantitativní popis botnání zobrazuje rovnice (1) a vyjadřuje se, jako stupeň nabotnání Q . Definuje se jako hmotnost kapaliny pohlcené xerogelem,

$$Q = \frac{m_t - m_0}{m_0} = \frac{\rho \cdot \Delta V}{m_0} \quad (1)$$

kde m_t je hmotnost bobtnajícího xerogelu v čase t od počátku botnání, m_0 je počáteční hmotnost xerogelu, ρ je hustota nízkomolekulárního rozpouštědla a ΔV je objem pohlceného rozpouštědla [2].

2.1.2 Rozdělení gelů

Rozdělení gelů je nejčastěji podle schopnosti návratu z vysušeného stavu do stavu původního, a to na gely reverzibilní a ireverzibilní [1][1].

2.1.2.1 Reverzibilní gely

Reverzibilní gely vytvářejí stálé a dostatečně trvanlivé spoje, které vznikají působením sil chemické, nebo fyzikální povahy, mezi jednotlivými molekulami za vzniku prostorové sítě. Jejich struktura je velmi pevná. Strukturu gelů s chemickými vazbami je možné převést zpět na roztok pouze v případě odbourání chemických vazeb, což by mělo za následek diferenciaci povahy výsledného produktu, protože nemůžeme vyloučit odstranění i jiných vazeb. Při vzniku spojení fyzikálními silami můžeme docílit opětovného převedení do roztoku snížením afinity vysokomolekulární látky k rozpouštědлу, a to například snížením teploty [3].

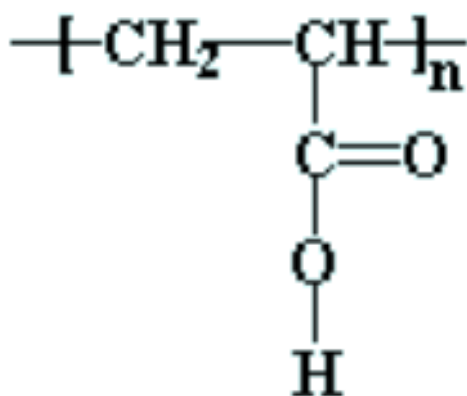
Na samotný vznik gelů má značný vliv teplota a koncentrace vysokomolekulární látky. S rostoucí teplotou roste i intenzita tepelných pohybů segmentů molekuly, tím dojde k zabránění vzniku spojů a gel tedy nevznikne. Naopak zvýšením koncentrace vysokomolekulární látky dojde k usnadnění vzniku gelu díky častějším srážkám makromolekul [3].

2.1.2.2 Ireverzibilní gely

Tyto gely vznikají gelací lyofobních solů, což jsou heterogenní disperzní systémy s kapalným disperzním prostředím a tuhým disperzním podílem, ke které dochází při snížení agregátní stálosti soustavy. Na určitých místech dochází k odstranění ochranné vrstvy a tím i poklesu stability, těmito místy se pak vzájemně spojují za vzniku prostorové sítě [3].

2.2 POLYAKRYLÁTY

Polyakryláty jsou důležitou skupinou polymerů, které jsou měkké tuhé a pružné. Jedná se o průhledné polymery s vysokou elasticitou a poměrně vysokou tepelnou odolností, která dosahuje až k hodnotě 450 K (přibližně 177 °C). Díky absenci násobných vazeb mají velmi dobrou odolnost vůči povětrnostním vlivům a také proti ozonu [4]. Ve většině případů se jedná o estery, jako například polymethakrylát. Nejjednodušším zástupcem je právě kyselina polyakrylová. Zároveň se jedná o polyelektrolyt, to znamená, že každý monomer nese ionizovatelnou skupinu, v tomto případě se jedná o karboxylovou skupinu. Strukturu tohoto polymeru znázorňuje Obrázek 1 [5].



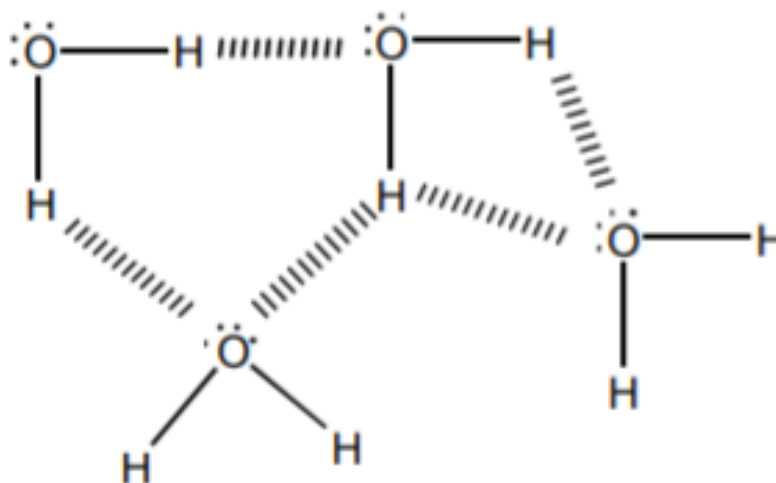
Obrázek 1. Kyselina polyakrylová [5]

2.3 SUPERABSORBENTY

Z chemického hlediska se jedná o syntetické polymerní molekuly neboli makromolekulární látky. Jako superabsorbenty tedy označujeme polymery, konkrétně polymery kyseliny akrylové [5], které jsou schopné absorbovat vysoké množství vody oproti ostatním absorbujícím materiálům. Tyto polymery mají schopnost vytvářet pomocí síťovacích činidel (*cross-linkers*) prostorové sítě. Absorbovaná kapalina se poté nachází v této síti fixovaná silnými vodíkovými můstky a absorbuje do té doby, kdy dojde k zastavení rozestupu jednotlivých řetězců, mezi které je absorbována [6][7][8]

Zároveň se tyto polymery řadí do skupiny polyelektrolytů, to znamená, že obsahují skupiny, které jsou schopné elektrolytické disociace za vzniku makroiontu s velkým počtem elementárních nábojů [6].

Co se týče mechanismu bobtnání superabsorbentů (SAP), dochází nejprve k hydrataci, kdy interagují ionty rozpouštěné látky s molekulami rozpouštědla. Tato interakce způsobí vznik vodíkových můstků, což znázorňuje Obrázek 2. Superabsorbenty mají hydrofilní charakter a díky němu mají tendence se ve vodě rozpouštět. Rozpouštění zabraňuje přítomnost síťovacích činidel v molekule SAP, toto je způsobeno elastickými smršťovacími silami. Tento proces je doprovázen snížením entropie řetězců, protože z původního neuspořádaného stavu vznikají tužší a pevnější struktury, přičemž stupeň síťování je přímo úměrný stupni nabobtnání polymeru a síle vzniklé sítě. Konkrétně to znamená, že když zvýšíme stupeň síťování, sníží se stupeň nabobtnání a zároveň se zvýší pevnost gelu [9].



Obrázek 2. Vodíkové můstky mezi jednotlivými molekulami vody [9]

2.3.1 Využití superabsorpčních polymerů

Využití superabsorpčních polymerů se nachází v mnoha odvětvích průmyslu a medicíně. Můžeme se s nimi setkat v zemědělství, zahrádkářství, stavebnictví, ale i v běžném životě, kdy se využívají například v plenách [10].

Využití v zemědělství je založeno na schopnosti polymerů vázat vodu, následně ji postupně uvolňovat a tím prodloužit přežití rostlin i v místech, kde je pro rostliny vody nedostatek. Syntetické superabsorpční polymery mají tedy v zemědělství důležitou roli, a to hlavně při vytváření prospěšných klimatických podmínek pro růst rostlin [11][12].

Díky svým absorpčním vlastnostem můžeme jejich využití najít i v medicíně, kdy se využívají především jako nosiče léčiv s jejich cíleným uvolňováním, ale také mohou být využity pro odstraňování vody při chirurgických operacích nebo implantáty. Příkladem léčby pomocí superabsorbentů jako nosičů, jsou polymery obsahující glukózu, jejíž postupné uvolňování je způsobené impulzy, v tomto případě nedostatkem glukózy v krvi pacienta. Dále polymery na bázi celulózy mohou být využity k léčbě otoků [13][14].

V neposlední řadě můžeme tyto polymery využít při přípravě betonu. Při jeho přípravě je důležitá hydratace, konkrétně ve fázi tvrdnutí betonu. Dříve se využívaly nasycené lehké agregáty, u kterých nastávaly problémy při kontrole konzistence a zároveň výrazně snižovaly sílu a modul pružnosti. Z tohoto důvodu se začaly používat superabsorpční polymery, které minimalizují tyto obtíže [15].

2.3.2 Druhy superabsorbentů využívané v zemědělství

Použití jednotlivých druhů bylo započato především díky nedostatečné efektivnosti komerčně využívaných hnojiv. Více než polovina těchto hnojiv byla smyta deštěm, a proto by se ani nedostala k rostlině. Docházelo tedy k výrazným ekonomickým ztrátám, ale zároveň i velmi závažnému znečištění životního prostředí. Z těchto důvodů se začalo využívat cílené uvolňování hnojiv a zároveň i nutrientů pro rostliny [16], které bude popsáno v kapitole 2.3.3. Nutrienty mohou být buď přímo ve struktuře polymeru, nebo v něm mohou být pouze obaleny a to tak, že se vkládají do roztoků a nechávají botnat [17][21].

2.3.2.1 Superabsorbenty s anorganickou složkou

Tento druh superabsorbentů nese zainkorporovanou anorganickou složku, která slouží jako část výživy pro rostliny. Nejčastějším používaným zástupcem této složky bývá dusík, fosfor, draslík nebo bor [17][18]. Jak již bylo zmíněno, více než polovina hnojiv, ale i jednotlivých nutrientů, jako je právě dusík, fosfor a draslík, které se souhrnně označují jako NPK, je ztracena a dochází ke znečištění. Konkrétně v případě dusíku se jedná o ztrátu z původní hmotnosti o 40–70 hm %, v případě fosforu 80–90 hm % a v případě draslíku se jedná o ztrátu 50–70 hm % z původního množství, které hnojivo obsahovalo [19].

2.3.2.2 Superabsorbenty s organickou složkou

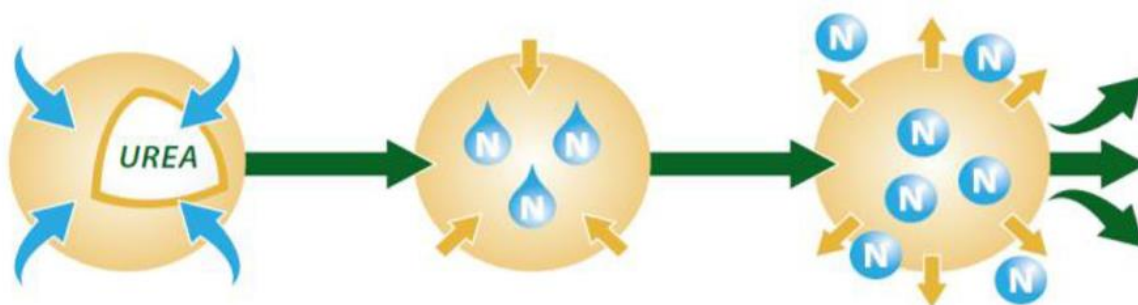
Polymery nesou ve své struktuře organickou část nutrientů, tedy organickou složku hnojiva. Nejvyužívanějšími organickými složkami jsou především močovina nebo huminové kyseliny. Močovina je využívána díky poměrně vysokému obsahu dusíku, ale jakožto neutrální organická molekula je obtížně absorbovatelná nabitými částicemi půdy [20], ve většině případů jsou tedy používány její deriváty, jako je například biuret. Superabsorbenty jsou následně schopné pohltit velké množství vysoce koncentrovaného roztoku močoviny a vytvořit tak homogenní hydrogel s vysokou koncentrací dusíku [21]. Jednou z funkcí huminových kyselin je stimulace růstu rostlin nebo zlepšení struktury půdy a zvýšení zadržování vody a hnojiv, proto jsou tyto látky velmi často objektem dalších studií [22].

2.3.2.3 Superabsorbenty s anorganickou i organickou složkou

Příkladem těchto zástupců jsou polymery, které obsahují huminové kyseliny, které představují organickou část, a jako anorganická část může být použit Palygorskit. Chemicky se jedná o krystalizovaný hydratovaný křemičitan hořečnatý, který kromě hořčíku a křemíku obsahuje i další prvky, například draslík, fosfor, vápník, železo nebo mangan. Pro svůj velký povrch je velmi často používán jako absorbent. Další kombinací organické a anorganické složky může být huminová kyselina a směs prvků dusík, fosfor a draslík [23].

2.3.3 Uvolňování nutrientů

Prvním pohledem na uvolňování byla přeměna chemické látky do formy, která je vhodná jako nutrient pro rostlinu. Následně je procesem kontrolovaného či pomalého uvolňování, přenesena část chemické látky v podobě nutrientu do rostliny [24]. Přesnější definice popisuje tento proces tak, že nosič, kterým může být právě superabsorpční polymer, obsahuje nutrienty pro rostliny, a to v takové formě, kdy se jeho dostupnost opoždí a zároveň se tak prodlouží její účinek a dostupnost pro rostlinu. Počátečnímu opoždění a prodloužení dostupnosti docílíme například pomocí semipermeabilních povlaků, u kterých dochází ke kontrolovanému rozpouštění ve vodě, nebo pomalou hydrolýzou, látek rozpustných ve vodě, v nízkomolekulárních rozpouštědlech [25]. Většina nosičů je potažena anorganickým, nebo organickým materiálem, přes který pronikají nutrienty. Co se mechanismu týče, dochází nejprve k absorpci vody, která proniká skrz potah. Jakmile se voda dostane k vnitřní stěně potahu, začne rozpouštění hnojiva a zvýšení vnitřního tlaku roztoku. Nakonec dochází k samotnému uvolnění. Tento proces znázorňuje Obrázek 3 [26].



Obrázek 3. Proces uvolňování nutrientů [26]

2.4 NUTRIENTY VYUŽÍVANÉ VE SPOJENÍ SE SUPERABSORBENTY

2.4.1 Anorganické nutrienty

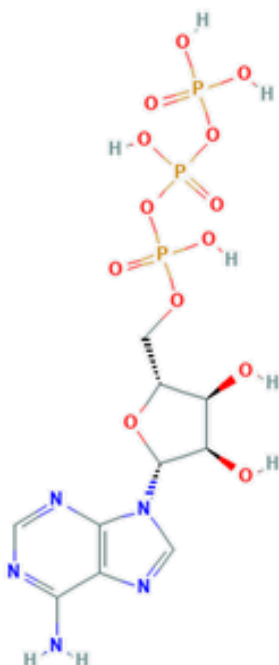
Jak již bylo zmíněno, anorganické nutrienty ve spojení se superabsorbenty zastupuje nejčastěji anorganické hnojivo NPK, které obsahuje prvky dusík, fosfor a draslík. Koncentrace jednotlivých prvků se udává pomocí poměru čísel, například 20–5–5, což znamená, že takto označené hnojivo obsahuje čtyřikrát více dusíku než fosforu a draslíku. Udaná koncentrace makroelementů může být použita k určení potřebného množství hnojiva [27].

2.4.1.1 Dusík

Dusík jako nutrient zajišťuje rostlině růst, a to především listů rostliny [27]. Konkrétně je dusík nezbytný pro chlorofyly, které umožňují rostlinám provádět fotosyntézu, tedy schopnost přeměňovat oxid uhličitý a vodu na monosacharidy (glukosu). Též se jedná o významnou složku aminokyselin, a tedy i proteinů. Rovněž může být využit jako nápomocná složka u sloučenin, které umožňují skladování a využití energie [28]. Rostliny využívají dvě formy dusíku, dusík ve formě nitrátů a ve formě amonné [29].

2.4.1.2 Fosfor

Fosfor ve velké míře napomáhá při růstu kořenů, květů a případně i plodů rostlin [27]. Napomáhá celkové struktuře, kvalitě plodin nebo produkci semen. Nachází se v nukleových kyselinách a zároveň jako složka makroergních sloučenin, například adenosintrifosfát (ATP), jehož strukturu zobrazuje Obrázek 4 nebo guanosintrifosfát (GTP) [28].



Obrázek 4. Struktura adenosintrifosfátu [30]

2.4.1.3 Draslík

Draslík napomáhá správnému fungování rostlin [27]. Zároveň nachází důležitou roli při vlastním růstu a rozvoji rostliny. Často se označuje jako kvalitativní prvek, protože přispívá ke kvalitativním vlastnostem, kterými jsou například velikost, barva, tvar a případně i chuť. Při nedostatku draslíku dosahují menšího vzrůstu a poskytují podstatně nižší výtěžky (například plodů) [28].

2.4.1.4 Železo

Železo, podobně jako u člověka, napomáhá v přenosu kyslíku. Pokud není přítomno železo, není schopna rostlina produkovat chlorofyl, nedokáže přenášet kyslík a nebude zelená, proto jeho nepřítomnost indukuje zežloutnutí rostliny. Železo je také nezbytně nutné pro funkci určitých enzymů [31].

2.4.1.5 Vápník

Vápník je zástupcem esenciálního nutrientu, který rostlina přijímá kořeny. Hraje důležitou roli v buněčné stěně a membránách nebo jako intracelulární posel v cytosolu buněk [32]. Při nedostatku vápníku nebude docházet ke správnému vývoji tkání, jako jsou špičky kořenů a mladých listů. U zralejších rostlinných tkání bude docházet k rychlejšímu odumírání [33].

2.4.2 Organické nutrienty

Stejně jako anorganické nutrienty jsou i organické velmi důležité v životě rostlin. Nečastějšími zástupci jsou již zmíněné huminové kyseliny nebo například močovina [20], [22].

2.4.2.1 Huminové látky

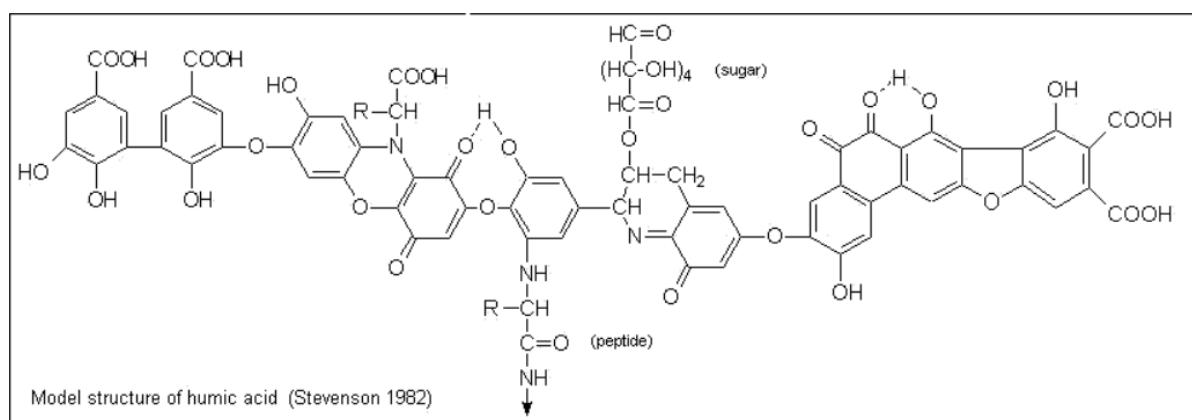
Jedná se o přírodní organické látky, které vznikají chemickým a biologickým rozkladem organické hmoty, tedy zbytky rostlin nebo rozkladem těl živočichů, spolu se syntetickou činností mikroorganismů v půdě. Vyskytují se především v zeminách, sedimentech, rašelině či ligninu. Hlavní složkou huminových látek jsou huminové kyseliny, fulvokyseliny a humin. Strukturně tedy obsahují aromatické jádro a funkční skupiny (karboxylové, karbonylové, hydroxylové, aminové a amidové) [34]. Z chemického hlediska se mohou dělit na nízkomolekulární a vysokomolekulární část, kdy vysokomolekulární část působí pozitivně na fyziologii rostliny, do které se dostává pomocí nízkomolekulární části. Pozitivní účinek tedy pozorujeme pouze, když působí obě části společně, které musejí být plně rozpustné [35].

Huminové kyseliny jsou látky jejich molekulová hmotnost se pohybuje v rozmezí hodnot 10 000–70 000 g/mol. Ve své struktuře obsahují aromatické jádro, kyslíkaté a dusíkaté heterocykly, na které se navazují alifatické řetězce s bohatým obsahem různých funkčních skupin [36]. Huminové kyseliny obsahují jak kladné, tak záporné náboje, avšak jejich celkový náboj je záporný. Modelovou strukturu zobrazuje Obrázek 5. Spolu s fulvokyselinami mají schopnost zvyšovat příjem živin rostlinami. Některé živiny jsou dokonce bez přítomnosti huminových kyselin pro rostlinu nepropustné [37].

Kromě zvýšení příjmu živin jsou schopné zabraňovat toxinům vstupu do rostliny tak, že se na ně huminové kyseliny navážou, uzamknou je v sobě a následně jsou z půdy odplaveny. Díky tomuto zůstávají rostliny zdravější [37].

Další důležitou schopností huminových kyselin je zvýšení zadržování vody v půdách. Záporný náboj huminových kyselin přitahuje kationty, v přítomnosti vody se pak uvolní z molekuly kyseliny a navazují se na kyslík obsažený ve struktuře molekuly vody. Takovéto molekuly se připojují k dalším a snižují tak vypařování vody až o 30 % [37].

Jednou z nejdůležitějších vlastností je jejich vliv na mikrobiální populace obsažené v půdě. Mnoho těchto populací bylo zničeno právě používáním pesticidů či špatným složením půd. Huminové kyseliny podporují růst populací a to tak, že nejprve poskytují zdroj uhlíku, který slouží jako zdroj výživy pro mikroby a následně poskytují prostor pro růst populací [37].



Obrázek 5. Modelová struktura huminové kyseliny [38]

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V dnešní době je snaha přivést využití superabsorpčních polymerů do zemědělství, a to hlavně díky své schopnosti pojmout obrovský objem vody. Nečastějšími druhy superabsorpčních polymerů jsou právě polymery na bázi kyseliny akrylové či akrylamidu. Na těchto polymerech byla provedena řada testů, které ukázaly velmi pozitivní výsledky. Byl například pozorován pokles potřeby zavlažovací vody, docházelo ke zlepšení zadržování hnojiv v půdě či ke snížení úmrtnosti rostlin [39].

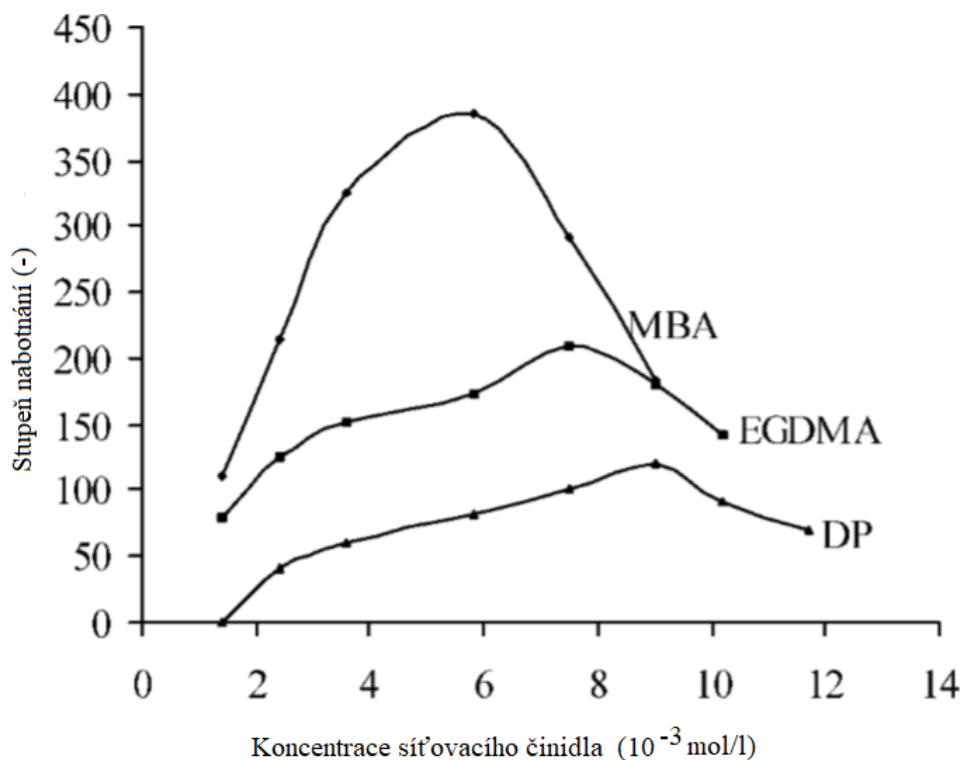
V publikaci [39] byla zkoumána botnací charakteristika připravených polymerů kyseliny akrylové a kyseliny polyakrylové zreagované s humátem sodným. Vzorek byl ponořen do destilované vody a ponechán při pokojové teplotě. Nabotnalé polymery byly odebrány z vody a zváženy. Z hmotnosti původní navážky a nabotnalého polymeru byl následně vypočten stupeň nabotnání podle rovnice (1). Kromě botnací charakteristiky bylo proměřeno infračervené spektrum, které prokázalo reakci mezi kyselinou polyakrylovou a humátem sodným. Nakonec bylo provedeno skenování pomocí rastrovací elektronové mikroskopie, kdy byl nejprve vzorek pokryt zlatým filmem. Vzorek humátu nevykazoval propustnost, ale vzorek kyseliny polyakrylové a zreagované kyseliny polyakrylové s humátem sodným vykazoval mikropropustnost.

Oba vzorky, kyselina polyakrylová a kyselina polyakrylová s humátem sodným, byly použity při testování zadržování vody na růstu kukuřice. Pro toto testování byla použita kukuřičná semínka, která byla zasazena bez přítomnosti superabsorpčního polymeru, za přítomnosti kyseliny polyakrylové a za přítomnosti kyseliny polyakrylové s humátem sodným. Všechny 3 vzorky obsahovaly 2 kg půdy a 500 ml vody a byly po dobu 30 dní ponechány při teplotě 40 °C. Po 20 dnech rostliny, jejichž prostředí neobsahovalo žádný superabsorpční polymer, začaly vadnout. Po 30 dnech začaly vadnout rostliny, jejichž prostředí obsahovalo kyselinu polyakrylovou, kdežto rostliny v prostředí s kyselinou polyakrylovou s humátem vykazovaly stále dobrou kondici [39].

V publikaci [40] byl jako superabsorpční polymer použit kopolymer polyakrylamidu, akrylátu vápenatého a akrylátu sodného. V této práci se zabývali především testováním parametrů, které ovlivňují pohlcování vody polymerem a teplotní stabilitu polymeru. Pro teplotní analýzu byla použita diferenciální skenovací kalorimetrie, která ukazuje závislost tepelného toku na teplotě. Z křivky tedy byla odečtena teplota skelného přechodu, která pro tento konkrétní polymer je 219,5 °C. Vyšší teplota pak indikuje vyšší stupeň zesíťování. Teplotní stabilita byla měřena pomocí termogravimetrie, kdy vzorky do teploty 100 °C vykazovaly jen malé ztráty hmotnosti. Při teplotách nad 200 °C byly ztráty značnější a při teplotě 400 °C byla ztráta od původní hmotnosti 50 %. Touto metodou byla také stanovena počáteční teplota rozkladu na 350 °C.

Dále se v této práci zbývali jednotlivými komponentami připraveného polymeru a jejich vliv na elasticity nabotnalého gelu a samotnou botnací schopnost. Při testování vlivu síťovacího činidla byl vliv testován na vzorku methylenbisakrylamidu (MBA), ethylenglykol dimethakrylátu (EGDMA) a diallylfthalátu (DP) [40].

Stupeň nabotnění u vzorku MBA byla nejvyšší při koncentraci $5,8 \cdot 10^{-3}$ mol/l, u vzorku EGDMA při koncentraci $9 \cdot 10^{-3}$ mol/l a u vzorku DP $7,5 \cdot 10^{-3}$ mol/l. Obrázek 6 ukazuje závislost stupně nabotnění vody na koncentraci síťovacího činidla, kdy při použití MBA bylo dosaženo největšího stupně nabotnění [40].



Obrázek 6. Závislost absorpce vody na koncentraci síťovacího činidla [40]

Dále byl zkoumán vliv iniciačního činidla pro vzorek peroxydisulfátu amonného (APS) a chloridu sodného (NaCl). U vzorku APS byl dosažen maximální stupeň nabotnění u koncentrace $3,2 \cdot 10^{-3}$ mol/l. U vzorku NaCl se se zvyšující koncentrací snižoval stupeň nabotnění, tedy při vysokých koncentracích solí klesá schopnost polymeru přijímat vodu [40].

Kromě zmíněných testování byl dále zkoumán vliv superabsorpčních polymerů na rostliny při dostatku vody, bez dostatečného množství vody či interakce s ionty solí, které obsahuje půda. Tato testování byla provedena v publikaci [41]. Testování růstu rostlin při dostatečném množství vody a za přítomnosti polymeru ukázalo, že i při těchto podmínkách podporují růst kořenů a výhonků. Studie dále prokázala, že při nedostatku vody přežívaly rostliny v přítomnosti superabsorpčních polymerů déle, také docházelo ke značnému snížení výdeje vody povrchem rostlin. Co se týče interakcí s ionty solí, v přítomnosti superabsorpčních polymerů opět přežívaly rostliny podstatně déle. Zároveň bylo prokázáno, že přítomnost solí snižuje stupeň nabotnění. Konkrétně například vápenaté ionty snižují botnací schopnost, bylo ale zjištěno, že draselné ionty potlačují tento vliv vápenatých iontů [41].

V publikaci [42] se vědci zabývali jiným druhem superabsorpčního polymeru, a to na bázi celulózy. Konkrétně se jedná o polymer tvořený sodnou solí karboxymethylcelulózy a hydroxyethylcelulózu. Jako síťovací činidlo byl v tomto případě použit 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl)karbodiimid hydrochlorid. Jako u již zmíněných publikací, i u této byla nejprve změna botnací charakteristika připravených gelů. Nejprve byla zvážena hmotnost suchých vzorků, o koncentraci celulózy 3, 4 a 5 hm %, které byly následně ponořeny do destilované vody. Po 24 hodinách byla zvážena hmotnost nabotnalého gelu a podle rovnice (1) byl vypočten stupeň nabotnutí. Dále bylo zkoumáno chování v roztocích s různou iontovou silou a pH. Vzorky byly opět nejprve zváženy a následně ponořeny do roztoků s různou iontovou silou a ponechány do dosažení rovnováhy. Stejně měření bylo provedeno pro roztoky s různými hodnotami pH, pouze s tím rozdílem, že bylo přidáno ekvivalentní množství NaCl, aby byla hodnota iontové síly ve všech roztocích stejná.

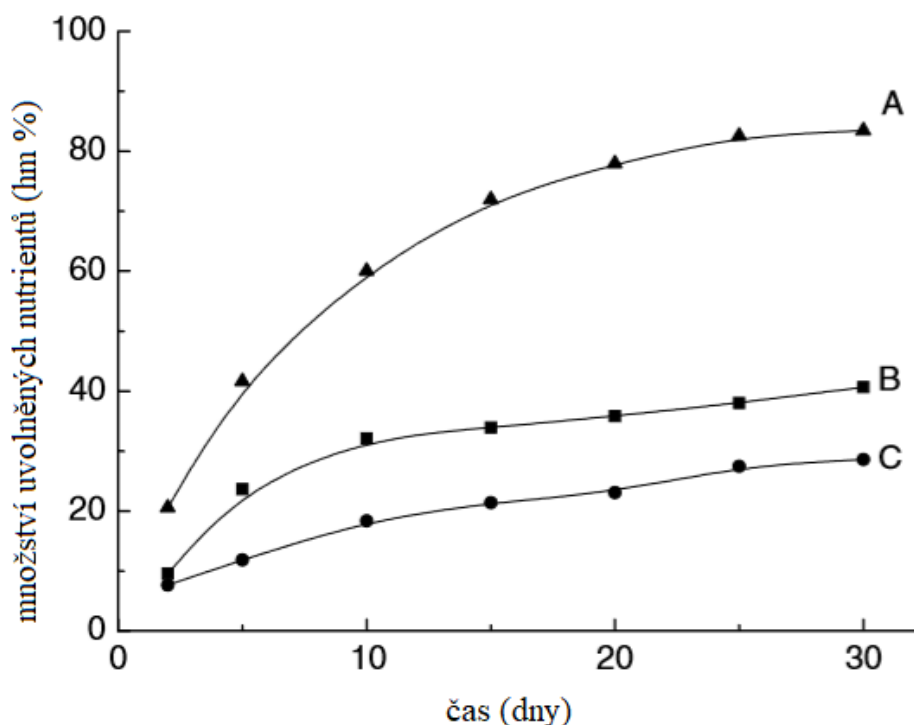
Výsledek ukázal, že největší stupeň nabotnutí má polymer o koncentraci 4 hm %, proto byl použit na další testování na rajčatech. Do půdy bylo přidáno ekvivalentní množství suchého polymeru tak, aby půda obsahovala 0,2 hm %, 0,5 hm % a 1 hm %, zároveň byl připraven kontrolní vzorek, který neobsahoval polymer. Tyto experimenty prokázaly snížení ztrát vody, která byla buď odvodňována, nebo vypařována [42].

Využití superabsorpčních polymerů v zemědělství má tedy velmi jasnou budoucnost. Veškeré experimenty ukázaly nejen na výborné absorpční schopnosti těchto polymerů, ale také na jejich schopnost snížit potřebné množství zavlažovací vody, a tím tak i snížení úmrtnosti rostlin. Dále zlepšují zadržování hnojiv v půdě a zvýšení rychlosti růstu rostlin. Následně se ale objevila snaha připravit snadněji biodegradabilní superabsorpční polymery a zároveň snížit jejich cenu [43].

V publikaci [44] proto připravili kopolymer kyseliny akrylové a akrylamidu při použití škrobu jako iniciačního činidla a polyethylen glykolu (PEG) jako síťovacího činidla. V tomto případě byla polymerizace způsobena radiačními technikami využívajícími γ -záření. Studie ukázala, že zvyšování koncentrace monomerní jednotky rapidně snižuje schopnost absorbovat vodu, protože se zvyšuje pevnost polymeru. Zároveň ukázala že schopnost absorbovat vodu se zásadně zvyšuje se zvyšující se koncentrací síťovacího činidla do hodnoty 0,65 hm % PEG. Jednou z důležitých vlastností, které podporují následné využití v zemědělství je schopnost absorbovat vodu i při vysokých teplotách, díky čemuž bude následně možné využívat je i v pouštních oblastech. Dále se ukázalo, že po přidání malého množství, konkrétně 0,1 hm %, výrazně vylepšuje zdržování vody v půdě i v písku. Nejzásadnější výhodou, kterou tyto superabsorpční polymery poskytují, je schopnost ovlivnit klíčení a růst rostlin, zároveň podporují růst listů a kořenů [43].

Veškeré experimenty popsané v této kapitole byly zkoumány na superabsorpčních polymerech, které neobsahovaly nutrienty. Touto problematikou se zabývají v publikacích [45][46].

V publikaci [45] byl připraven kopolymer kyseliny akrylové a akrylamidu s APS jako iniciačním činidlem a MBA jako síťovacího činidla, dále byl do směsi přidán kaolín a směs NPK. S takto připraveným polymerem byly provedeny experimenty, které především zahrnovaly měření stupně nabotnění a cíleného uvolňování NPK pomocí elementární analýzy a indukčně vázaného plazmatu. Pro měření byl odebrán 1 g vzorku a smíchán s 200 g suché půdy, tento substrát byl uchováván v plastových kádinkách o objemu 200 ml a následně bylo přidáno 30 hm % vody. Tyto vzorky byly následně po určitou dobu ponechány při pokojové teplotě.



Obrázek 7. Cílené uvolňování draslíku (A), fosforu (B) a dusíku (C) v půdě [45]

Obrázek 7 zobrazuje cílené uvolňování NPK v půdě, kdy je patrné, že nejlépe uvolňovaným prvkem je draslík a nejhůře pak dusík, ale zároveň jsou hodnoty pro cílené uvolňování velmi příznivé [45].

V publikaci [46] byly provedeny stejné experimenty, jako byly v předchozí publikaci, pouze byly vzorky smíchány se 180 g půdy a jako vzorek byl v tomto případě polymer kyseliny akrylové, iniciačním činidlem byl peroxydisulfát draselný (KPS) a jako síťovací činidlo MBA. Výsledné uvolnění bylo změřeno pomocí elementární analýzy a atomové absorpční spektrofotometrie. V porovnání s předchozím případem bylo množství uvolněného dusíku podstatně vyšší a to konkrétně 73,2 hm %, stejně tak u fosforu, kdy bylo dosaženo hodnoty 64 hm %. V případě draslíku bylo naopak dosaženo menšího množství a to 68 hm %. Celkově pak bylo uvolněno 75 hm % nutričních.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE

- Kyselina akrylová (AA), Sigma–Aldrich.
- Methylen-bis-akrylamid (MBA), Sigma–Aldrich
- Peroxydisulfát draselný (KPS), FlukaAnalytical
- Lignohumát A (LH A)
- Lignohumát B (LH B), Amagro s.r.o.
- Hydroxid draselný (KOH), ONEX CHEMIE s.r.o.
- Destilovaná voda
- NPK, Amagro s.r.o.
- MQ voda, PURELAB–flex

4.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

- Analytické váhy, SCALTECH
- Předvážky
- Míchačka s ohřevem, Nicolet Impact 400
- Sušárna, Venticell
- pH meter a kontuktometer, METTLER TOLEDO
- UV/VIS spektrofotometer, HITACHI U-3900H
- ICP–OES spektrofotometr ULTIMA 2
- Ionový chromatograf METROHM A SUPP

4.3 PŘÍPRAVA SUPERABSORBENTŮ

Pro vlastní přípravu byly nejprve naváženy jednotlivé látky a vytvořeny roztoky AA (s 25 ml destilované vody) a KOH (s 10 ml destilované vody). Roztok kyseliny akrylové byl umístěn na míchačku a za stálého míchání byl postupně přikapáván roztok hydroxidu draselného. Následně byla přidána navážka NPK, MBA, Lignohumátu a KPS. Vzniklá směs, která byla po celou dobu míchána, byla zahřata na teplotu polymerace, která se u všech typů pohybovala v rozmezí ± 90 – 100 °C. Vzniklý polymer byl rozdělen na kousky a následně 4 dny sušen na látce při teplotě 80 °C. Dokonale vysušený vzorek byl rozdrcen na drobné kousky. Přesné navážky zobrazuje Tabulka 1.

Tabulka 1. Receptury jednotlivých superabsorpčních polymerů

| Hydrogel | A | B | C | D | H | CH |
|----------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| AA (g) | 14,25 | 14,25 | 14,25 | 14,25 | 14,25 | 14,25 |
| KOH (g) | 4,75 | 4,75 | 4,75 | 4,75 | 4,75 | 4,75 |
| MBA (g) | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 |
| KPS (g) | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| NPK (g) | 0,6602 | 6,6020 | 0,6602 | 6,6020 | | |
| LH (g) | | | 1 | 1 | 1 | |

Při přípravě superabsorbentu C, D a H došlo k problémům se sítováním, kdy vzniklé roztoky sice zpolymerizovaly, ale nedošlo k vytvoření prostorové sítě. Proto bylo nejprve postupně přidáváno množství MBA, dokud nedošlo k zesíťování. Po přidání pětinasobku MBA došlo k zesíťování a připravené polymery byly použity na následující charakteristiku (botnání).

Pro přípravu superabsorpčních polymerů byl následně použit i jiný lignohumát, při jehož použití došlo k zesíťování již s původní navážkou MBA. Proto byly oba lignohumáty podrobeny analýzám, které jsou popsány v následující kapitole.

4.4 CHARAKTERISTIKA RŮZNÝCH DRUHŮ LIGNOHUMÁTŮ

Při přípravě hydrogelu C, D, H došlo po přidání 1 g lignohumátu k problémům při síťování. Teplota polymerace, která by se měla pohybovat kolem 90 °C se vystoupala až ke 100 °C, a i přesto nedošlo k polymerizaci. Proto byl porovnán použitý lignohumát (A) a lignohumát (B) používaný v předchozích letech. Byla změřena vodivost, pH, UV–VIS spektrum a byla provedena elementární analýza vzorků a FT–IR.

Pro porovnání byly vytvořeny roztoky, kdy první obsahoval 13,8 mg LH A rozpuštěného ve 100 ml MQ vody a druhý obsahoval 13,9 mg LH B ve 100 ml MQ vody. Tyto roztoky byly následně použity k dalšímu měření.

4.4.1 Měření pH, vodivosti a UV–VIS spektra

Měření probíhalo na pH metru a konduktometru. Byly použity roztoky lignohumátů. U obou roztoků bylo nejprve změřeno pH a následně vodivost. Z každého roztoku bylo po měření odebráno 20 ml a smícháno s 20 ml MQ vody a znovu změřeno pH a vodivost. Všechny 4 vzorky byly po změření předchozích charakteristik proměřeny na UV–VIS spektrometru.

4.5 CHARAKTERISTIKA SUPERABSORBČNÍCH POLYMERŮ

Vytvořené superabsorbenty byly podrobeny dalším experimentům. Jedním z nich bylo studium jejich absorpčních vlastností, tedy botnání, popsané v kapitole 2.1.1.1. Dalšími měřenými charakteristikami byly vodivost, pH, UV–VIS, ICP–OES a iontová chromatografie.

4.5.1 Botnání

Pro toto měření bylo naváženo ± 50 mg jednotlivých vysušených gelů. Navážky byly následně smíchány se 100 ml destilované vody. V časovém úseku 24 h, 48 h a 72 h byly zváženy hmotnosti nabotnalých gelů. Druhá sada, která obsahovala lignohumát B, byla opět smíchána se 100 ml destilované vody a v časovém úseku 24 h, 48 h, 72 h a 96 h byly zváženy hmotnosti nabotnalých gelů.

4.5.2 Měření pH a vodivosti

Pro toto měření bylo připraveno celkem 60 vzorků, kdy každý obsahoval ± 50 mg jednotlivých vysušených gelů. Každý vzorek byl smíchán se 100 ml MQ vody. Všechny 60 vzorků bylo rozděleno do 10 sérií, kdy každá obsahovala každý gel po jednom. Jedna série tedy obsahovala jeden gel A, jeden gel B, jeden gel C, jeden gel D, jeden gel H a jeden gel CH, celkem tedy v jedné sérii bylo 6 vzorků. Po určitém časovém úseku byl ze vzorků odebrán gel a kapalná část vzorku byla následně podrobena měření. Měření probíhalo po dobu 6 týdnů a to po 6 h, 24 h, 48 h, 72 h a následně po týdně.

4.5.3 Měření UV–VIS spektra

Pro toto měření byly použity stejné vzorky jako pro měření pH a vodivosti. Z každé série byly vybrány vzorky, které původně obsahovaly gel s lignohumátem, tedy gel C, D a H a bylo změřeno UV–VIS spektrum, ze kterého bylo pomocí kalibrační křivky vypočteno uvolněné množství lignohumátu.

4.5.4 ICP–OES a iontová chromatografie (IC)

Pomocí ICP–OES bylo stanoveno množství uvolněného draslíku a fosforu. Nastavení přístroje zobrazuje Tabulka 2. Pomocí iontové chromatografie bylo stanoveno množství uvolněných dusičnanů a fosforečnanů. Pro IC byl použit přístroj Metrohm A Supp, přesné nastavení zobrazuje Tabulka 3.

Tabulka 2. Parametry přístroje

| | | |
|-------------------------|-------------|--------|
| Výkon | 1200 | W |
| Otáčky pumpy | 15 | ot/min |
| Průtok plazmového plynu | 14 | l/min |
| Průtok stínícího plynu | 0,8 | l/min |
| Tlak na zmlžovači | 3 | bar |
| Detektor | Fotonásobič | |

Tabulka 3. Parametry nastavení IC

| | | |
|--------------------|---------------------------------|------------|
| Objem nástřiku | 20 | μl |
| Průtok MF | 0,7 | ml/min |
| Složení MF | Na ₂ CO ₃ | 3,6 mmol/l |
| Teplota | 40 | °C |
| Název a typ kolony | Metrosep A Supp 7–250/4 | |
| Detektor | Vodivostní | |

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 CHARAKTERISTIKA LIGNOHUMÁTŮ

Jak již bylo zmíněno, při použití LH A došlo k problémům se síťováním, ovšem při požití LH B k žádným problémům nedošlo. Právě proto byly oba lignohumáty podrobeny další analýze.

5.1.1 Měření pH a vodivosti roztoků lignohumátů

Tabulka 4. Naměřené hodnoty pH

| LH A | LH B |
|-------|-------|
| 6,665 | 7,224 |

Tabulka 4 ukazuje, že pH lignohumátu A je nižší, a tudíž je tento vzorek kyselější, než je vzorek druhého lignohumátu.

Tabulka 5. Naměřené hodnoty vodivosti

| (μS/cm) | |
|---------|------|
| LH A | LH B |
| 282 | 236 |

Tabulka 5 ukazuje jednotlivé hodnoty vodivosti naměřených roztoků lignohumátů. Vzorek lignohumátu A má vyšší vodivost, než má druhý vzorek, což opět potvrzuje kyselost lignohumátu A, protože čím kyselější roztok je, tím vyšší vodivost pak má.

5.1.2 Elementární analýza

Tabulka 6 a Tabulka 7 zobrazují elementární složení jednotlivých vzorků. Z druhé tabulky, která zobrazuje lignohumát A, tedy nový lignohumát, je kyselější, což prokázalo i měření pH. Tučně znázorněné hodnoty jsou průměrné hodnoty jednotlivých prvků.

Tabulka 6. Elementární složení vzorku lignohumátu B

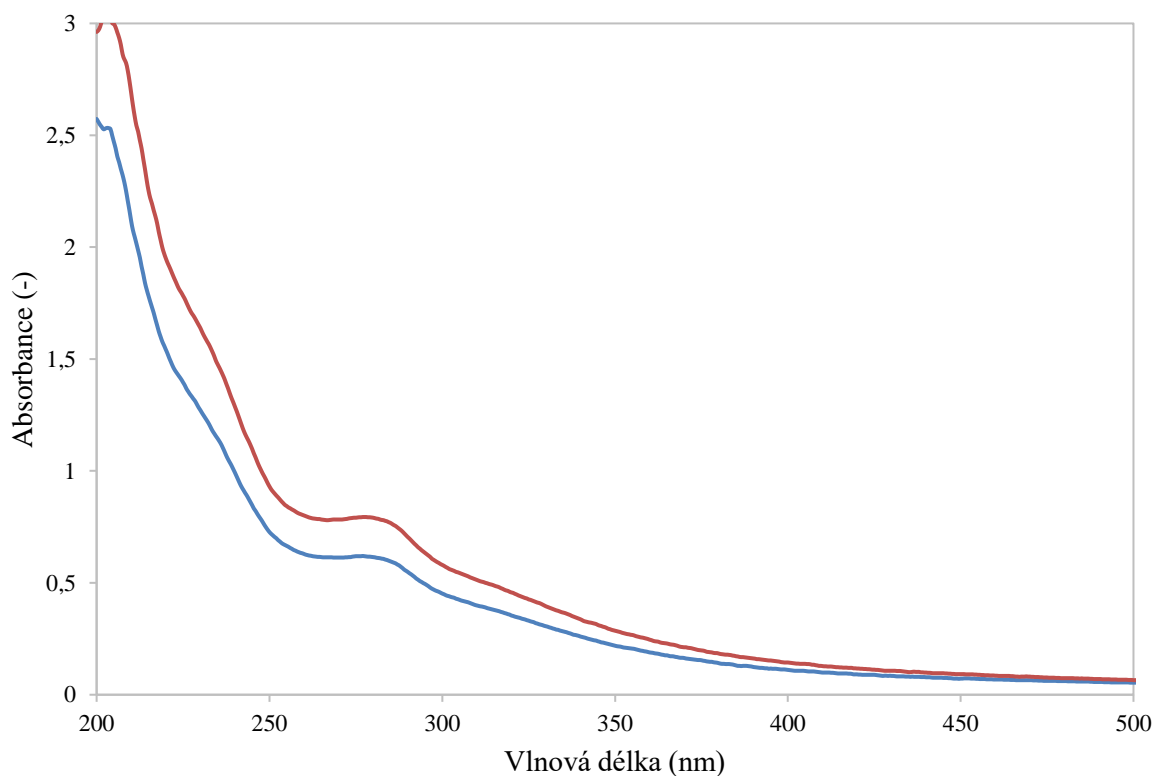
| (% at.) | | | | | | |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| N | C | H | O | C/H | O/C | C/N |
| 0,26 | 29,07 | 33,84 | 36,83 | 0,86 | 1,27 | 112,14 |
| 0,24 | 29,62 | 32,59 | 37,54 | 0,91 | 1,27 | 122,93 |
| 0,26 | 29,51 | 33,13 | 37,11 | 0,89 | 1,26 | 114,00 |
| 0,25 | 29,40 | 33,19 | 37,16 | 0,89 | 1,26 | 116,36 |

Tabulka 7. Elementární složení vzorku lignohumátu A

| (% at.) | | | | | | |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| N | C | H | O | C/H | O/C | C/N |
| 0,32 | 25,27 | 37,45 | 36,96 | 0,67 | 1,46 | 79,87 |
| 0,32 | 25,24 | 38,18 | 36,26 | 0,66 | 1,44 | 79,69 |
| 0,35 | 25,09 | 37,82 | 36,74 | 0,66 | 1,46 | 71,52 |
| 0,33 | 25,20 | 37,82 | 36,65 | 0,67 | 1,45 | 77,03 |

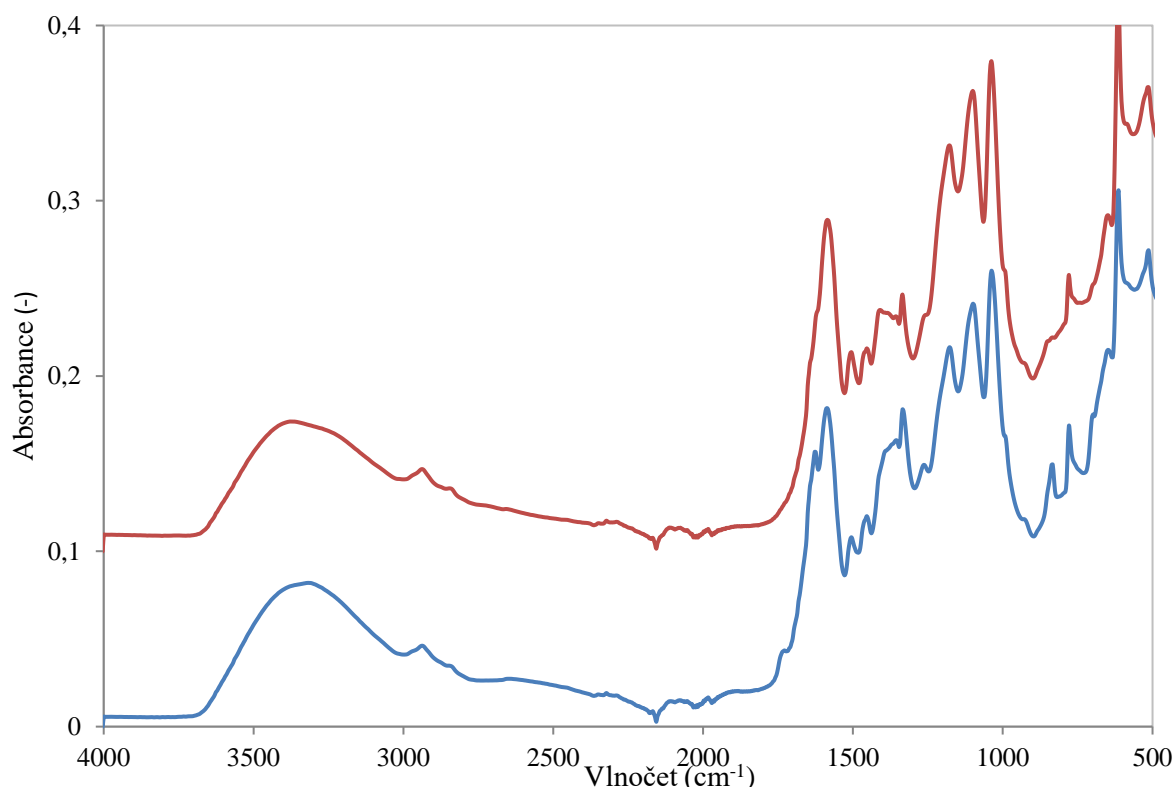
5.1.3 Měření UV–VIS roztoků lignohumátů

Obrázek 8 znázorňuje UV-VIS spektra připravených roztoků lignohumátů. Obrázek 8 Jsou vidět nepatrné rozdíly ve spektru vzorků. Z absorbancí při vlnových délkách 465 a 665 nm byl vypočítán humifikační index s označením E46. Pro vzorek LH A je hodnota indexu 4,23 a pro LH B 3,06. Tato hodnota vypovídá o molekulové hmotnosti, LH A má menší molekulovou hmotnost a zároveň i méně kondenzovanou strukturu, tedy obsahuje méně benzoových jader.



Obrázek 8. UV–VIS spektrum roztoků lignohumátů LH A (červená) a LH B (modrá)

5.1.4 FT-IR



Obrázek 9. Porovnání FT-IR spekter pro LH A (modrá) a LH B (červená)

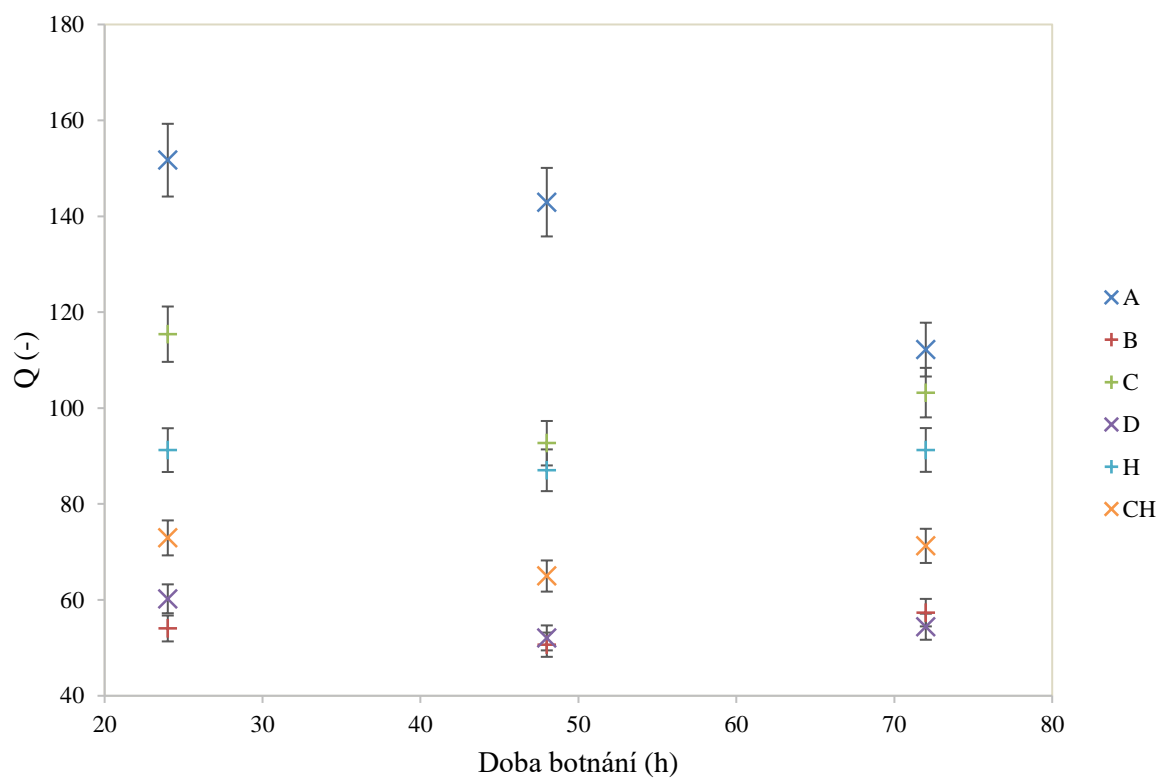
Obrázek 9 zobrazuje FT-IR spektra vzorků lignouhmátů, kdy u lignohumátu A můžeme vidět hned několik píků navíc oproti lignohumátu B. Nejdůležitější jsou píky v oblasti vlnočtu 1 500–1 800 cm^{-1} , kdy při nižší hodnotě absorbují karbonylové sloučeniny a při vyšší karboxylové kyseliny, které zvyšují kyselost lignohumátu, která byla potvrzena i předchozími měřeními. Při vlnočtu kolem 1 300 cm^{-1} absorbují ethery, které také mohou přispívat ke kyselosti lignohumátu, v této oblasti taktéž můžeme vidět rozdíl ve spektrech. V oblasti vlnočtu okolo 900 cm^{-1} mohou opět absorbovat karbonylové sloučeniny.

5.2 CHARAKTERISTIKA SUPERABSORPČNÍCH POLYMERŮ

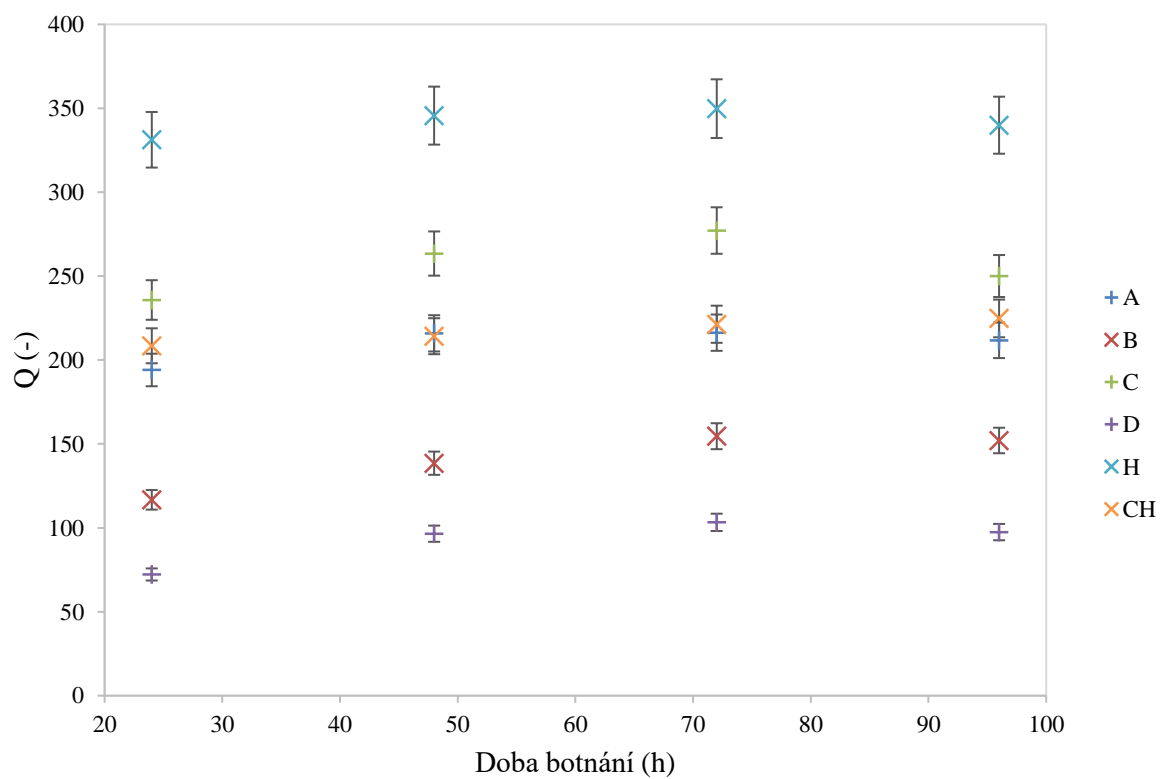
Vzorky, které obsahovaly lignohumát B byly nadále podrobeny bližším charakteristikám, jako je botnání, pH, vodivost a uvolňování nutrientů, které bylo změřeno pomocí ICP-OES a IC.

5.2.1 Botnání

Nejprve bylo změřeno botnání pro vzorky s lignohumátem A. Jak je vidět, tak průběh botnání je velmi nelineární, což znázorňuje i Obrázek 10. Pro vzorky s lignohumátem B byla prodloužena doba botnání. Výsledky těchto vzorků již vykazují konstantní charakter, který zobrazuje Obrázek 11.



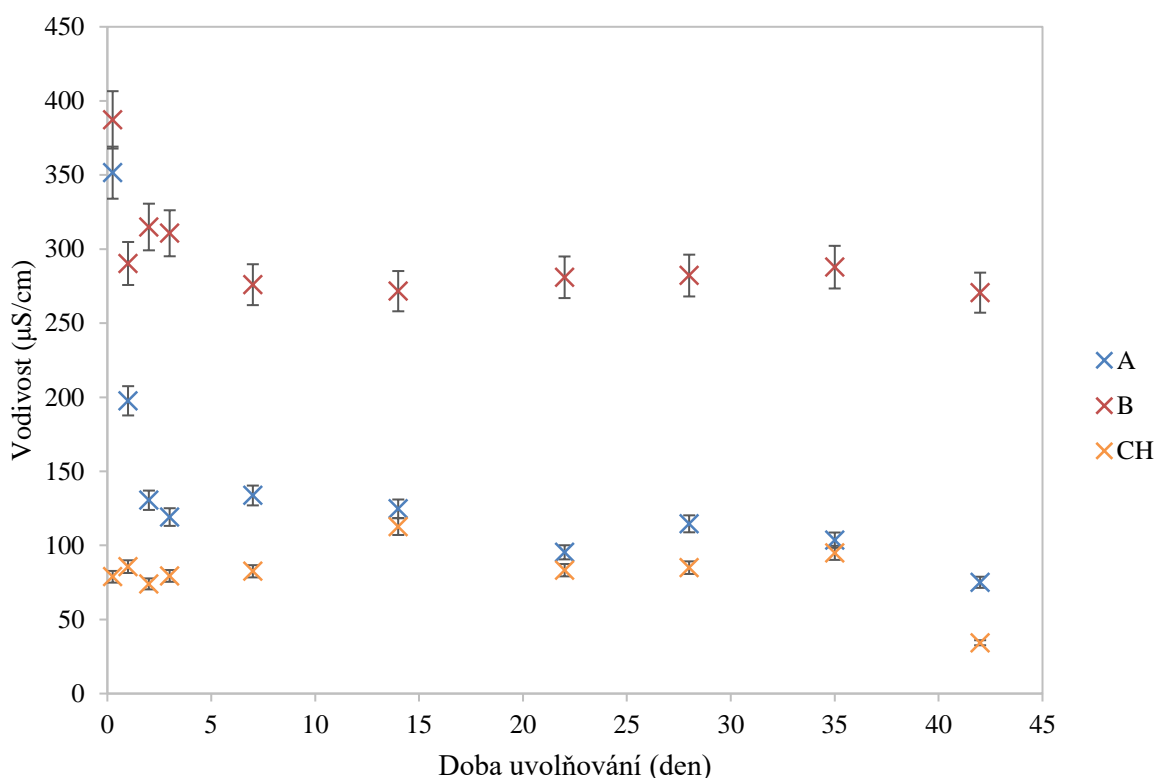
Obrázek 10. Závislost botnacího koeficientu na době botnání pro vzorky s LH A



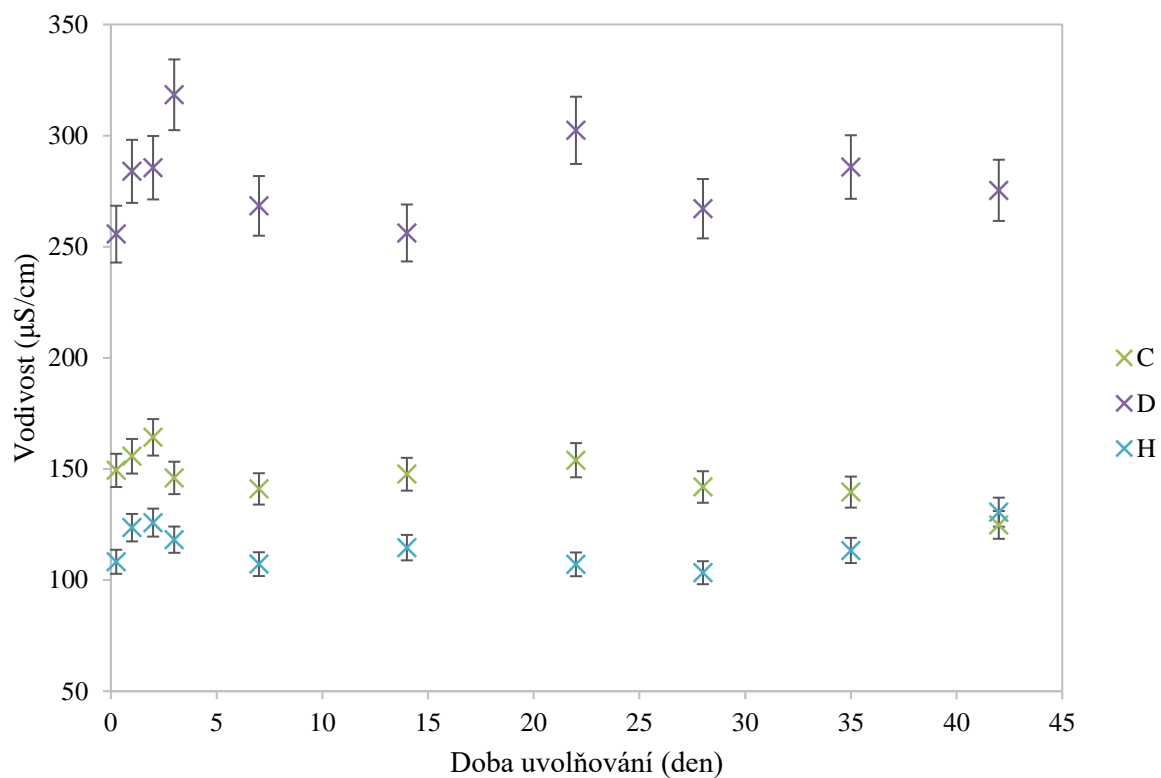
Obrázek 11. Závislost botnacího koeficientu na době botnání pro vzorky s LH B

5.2.2 Vodivost a pH

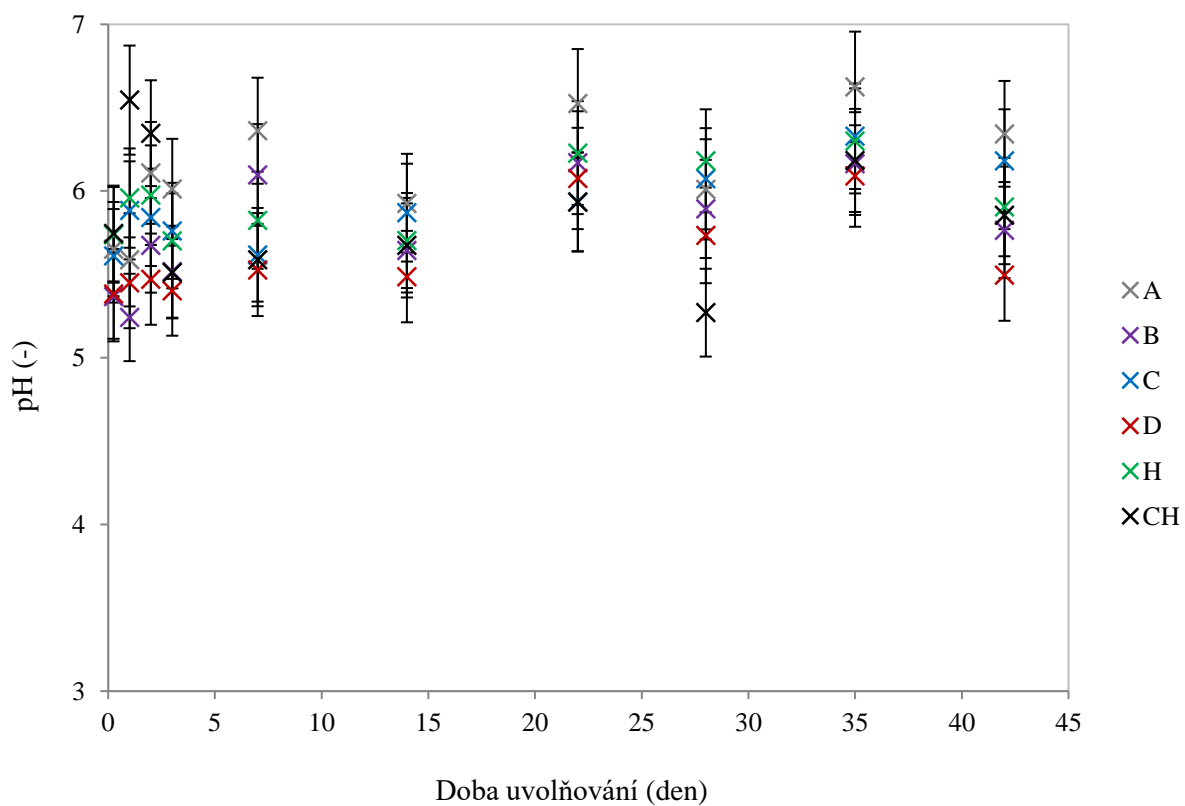
Po dobu 6 týdnů docházelo k postupnému uvolňování především iontů do vody. Jedná se o ionty draselné, dusičnanové a fosforečnanové a jejich množství pomohlo určit právě měření vodivosti roztoku. Obrázek 12 a Obrázek 13 ukazují jednotlivé závislosti, ze kterých je patrné, že nejvíce uvolněných iontů bylo ve vzorku B, konkrétně již po 6 hodinách uvolňování. U vzorku C a H se pak hodnoty téměř nemění. Pokud porovnáme hodnoty vodivosti všech vzorků, tak nejvyšší hodnoty byly naměřeny právě u vzorku B a u vzorku D. Oba vzorky obsahují stejné množství NPK, vzorek D obsahuje navíc lignohumát, který pravděpodobně způsobuje pomalejší uvolňování iontů.



Obrázek 12. Závislost vodivosti na době uvolňování pro vzorky A, B, CH



Obrázek 13. Závislost vodivosti na době uvolňování pro vzorky C, D, H

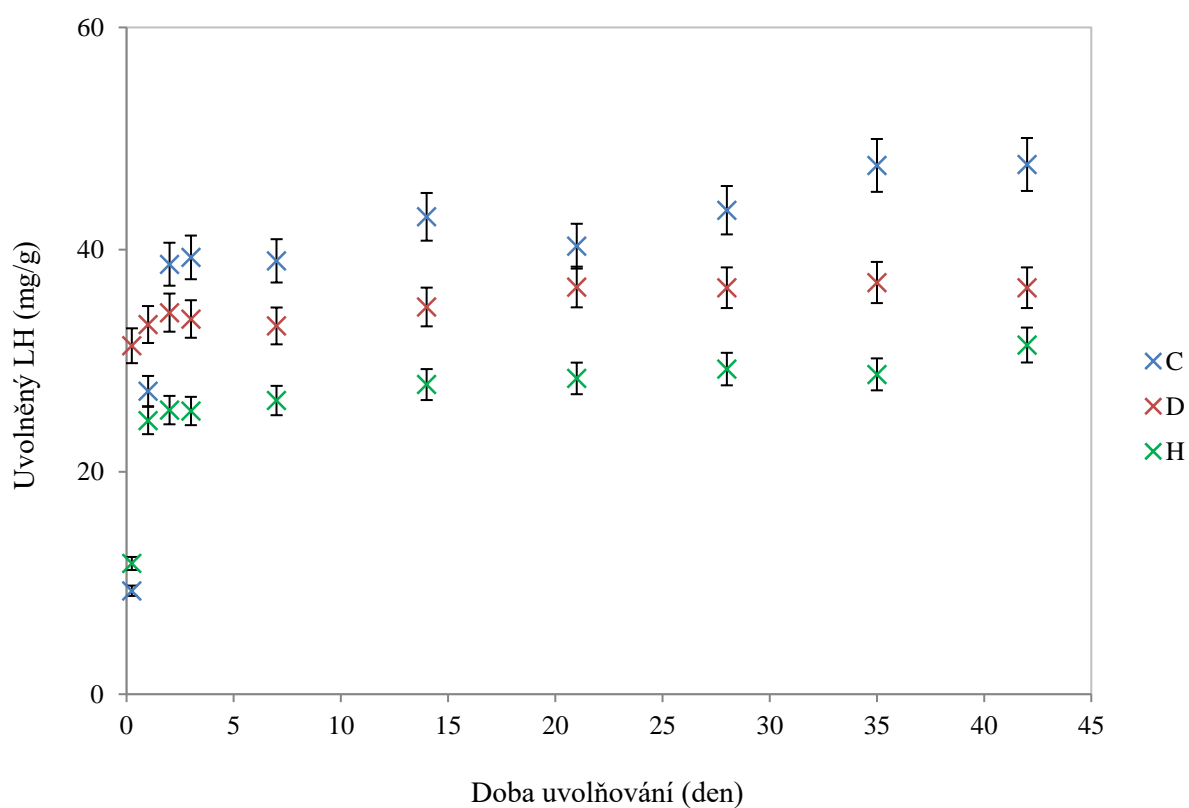


Obrázek 14. Závislost pH na době uvolňování

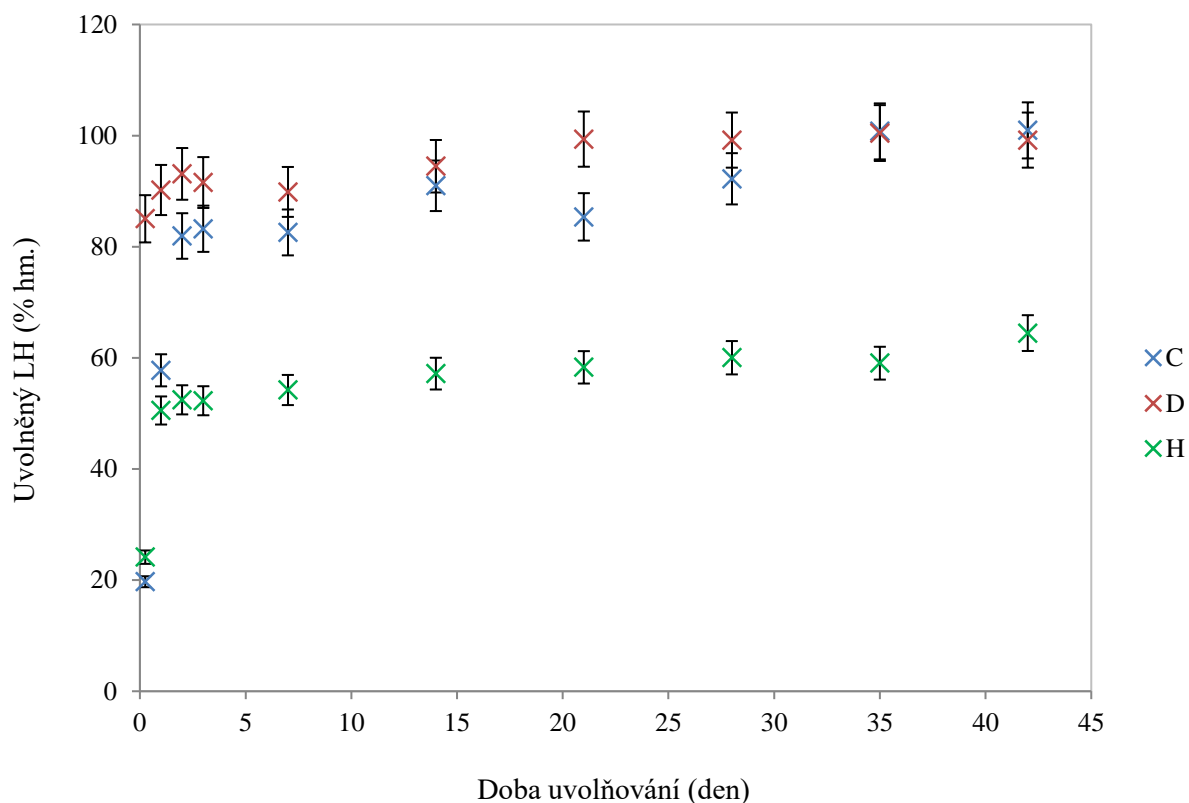
Pomocí měření pH bylo zjišťováno množství oxoniových a hydroxidových iontů. Hodnoty se u všech vzorků pohybují okolo 6 a zobrazuje je Obrázek 14. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u vzorku A po 35 dnech uvolňování, kdy hodnota byla 6,63. Nejnižší hodnota pak byla zaznamenána u vzorku B po 24 hodinách uvolňování. Naměřené hodnoty jsou velmi rozdílné a nelineárního charakteru. Můžeme ale vidět, že vzorky B a D jsou kyslejší, než jsou ostatní vzorky. Oba vzorky opět obsahují stejné množství NPK a vzorek D navíc lignohumát. Z těchto výsledků můžeme usoudit, že NPK podporuje uvolňování oxoniových iontů do roztoku.

5.2.3 UV–VIS

Pro vzorky C, D, H z každé řady bylo proměřeno UV–VIS spektrum, ze kterého byly následně vypočteny koncentrace uvolněného lignohumátu. Maximální hodnota koncentrace vycházejí z receptury jednotlivých superabsorbentů. Obrázek 15 a Obrázek 16 pak ukazují tyto závislosti, ze kterých je patrné, že celkově největší množství uvolněného lignohumátu bylo u vzorku C, ovšem co se týče uvolněného množství v hmotnostních procentech, bylo nejvíce uvolněného lignohumátu u vzorku D.



Obrázek 15. Závislost uvolněného lignohumátu na době uvolňování v mg/g

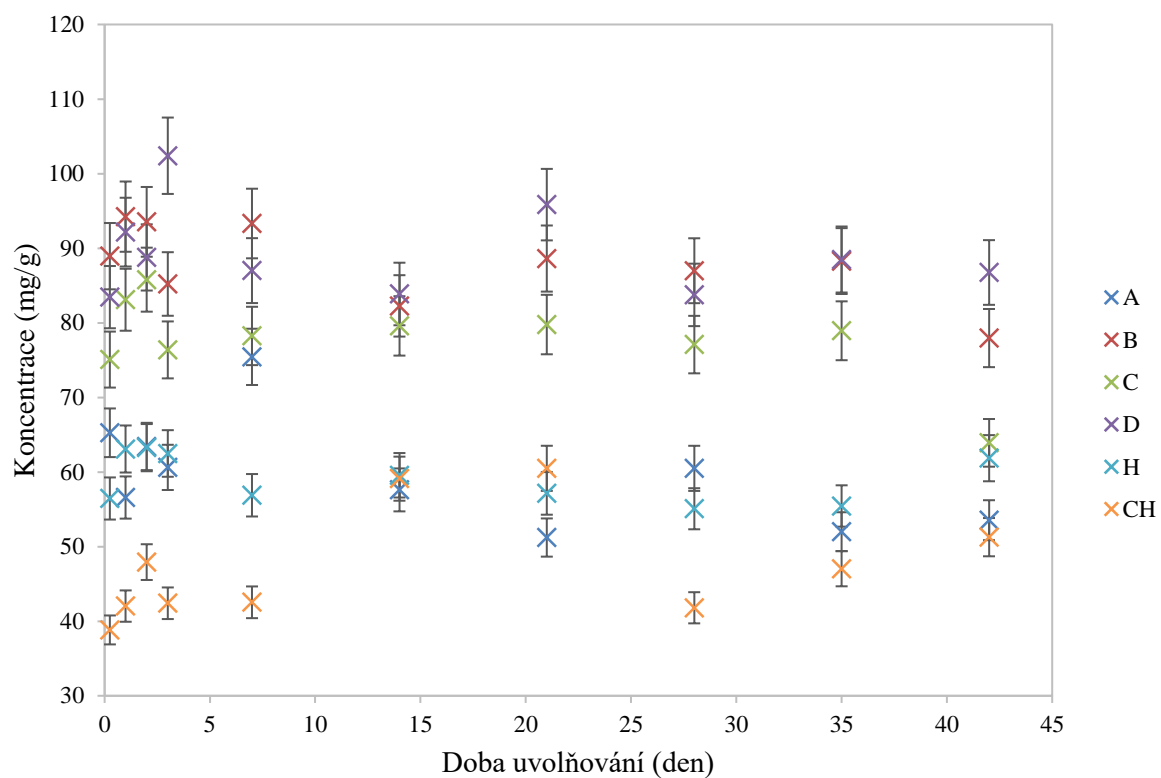


Obrázek 16. Závislost uvolněného lignohumátu na době uvolňování v % hm

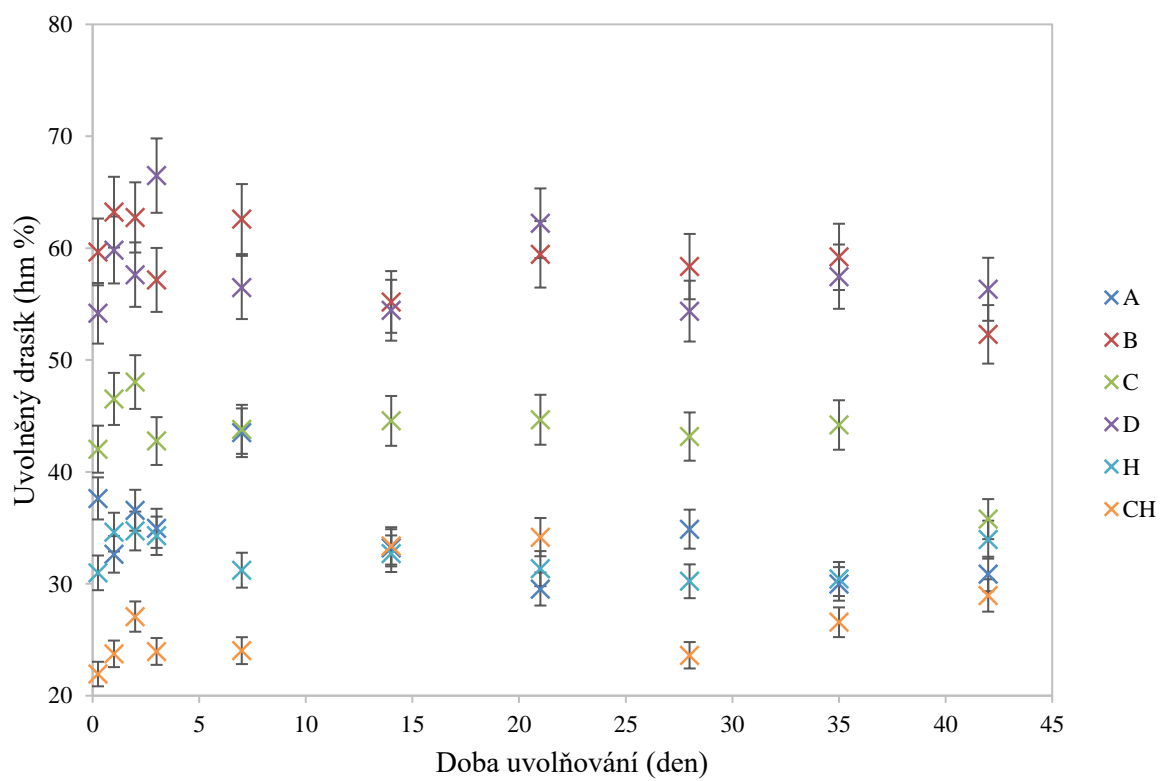
5.2.4 ICP–OES

Množství uvolněného draslíku a fosforu bylo měřeno pomocí ICP–OES. Nejvíce draslíku se uvolnilo ze vzorků B a D. Oba vzorky obsahovaly nejvyšší množství NPK. Draslík byl dále uvolněn i ze vzorků, které NPK neobsahovaly, docházelo tedy k uvolnění draslíku i z hydroxidu draselného. Obrázek 17 zobrazuje závislost uvolněného množství draslíku, Obrázek 18 zobrazuje množství uvolněného draslíku v hm %, kde opět největší množství uvolněného draslíku bylo zjištěno u vzorku B a D.

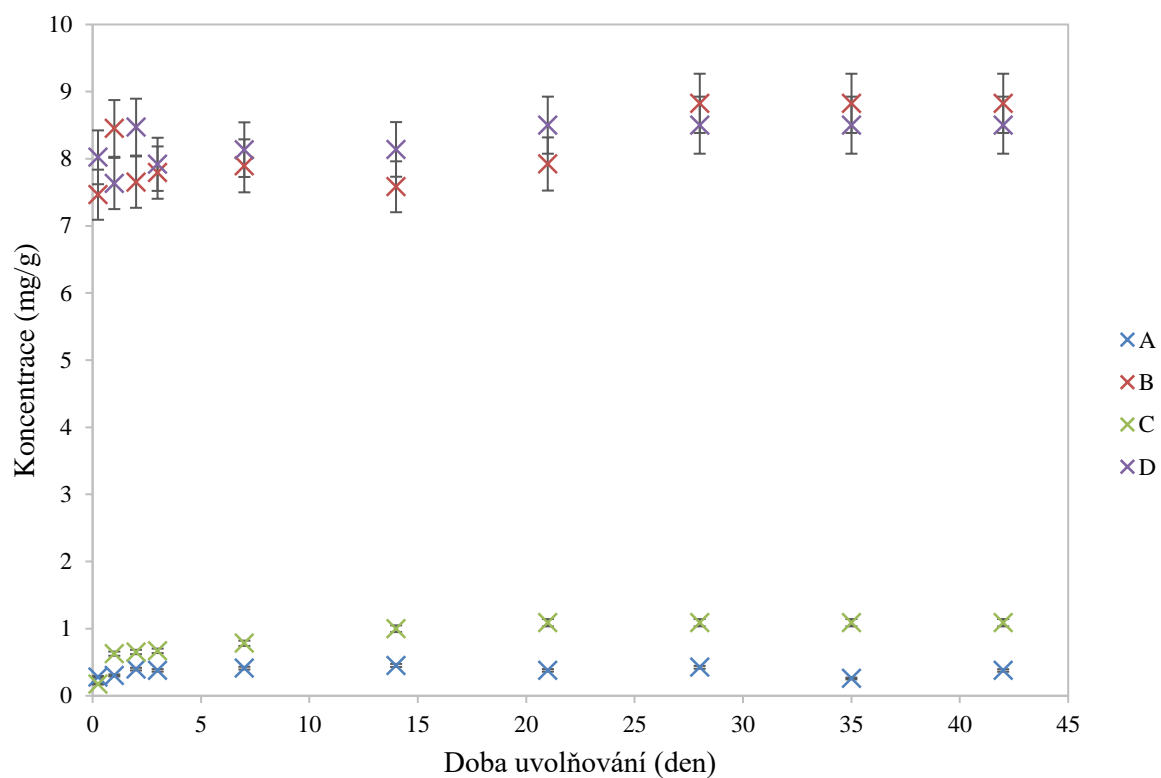
Fosfor byl uvolňován pouze ze vzorků A–D, vzorek H a CH neobsahovaly NPK. Nejvíce fosforu bylo opět uvolněno ze vzorků B a D, a to i v hm %. U vzorku C a D došlo již po třech týdnech k uvolnění veškerého přítomného fosforu. U vzorku B došlo k uvolnění veškerého množství fosforu. Z výsledků je dále patrné, že přítomnost lignohumátu podporuje uvolňování jak draslíku, tak fosforu. Pokud porovnáme vzorek A se vzorkem C, tak můžeme vidět vyšší množství uvolněných iontů u vzorku C, který kromě stejného množství NPK, má oproti vzorku A navíc i lignohumát. Závislosti znázorňují Obrázek 19 a Obrázek 20.



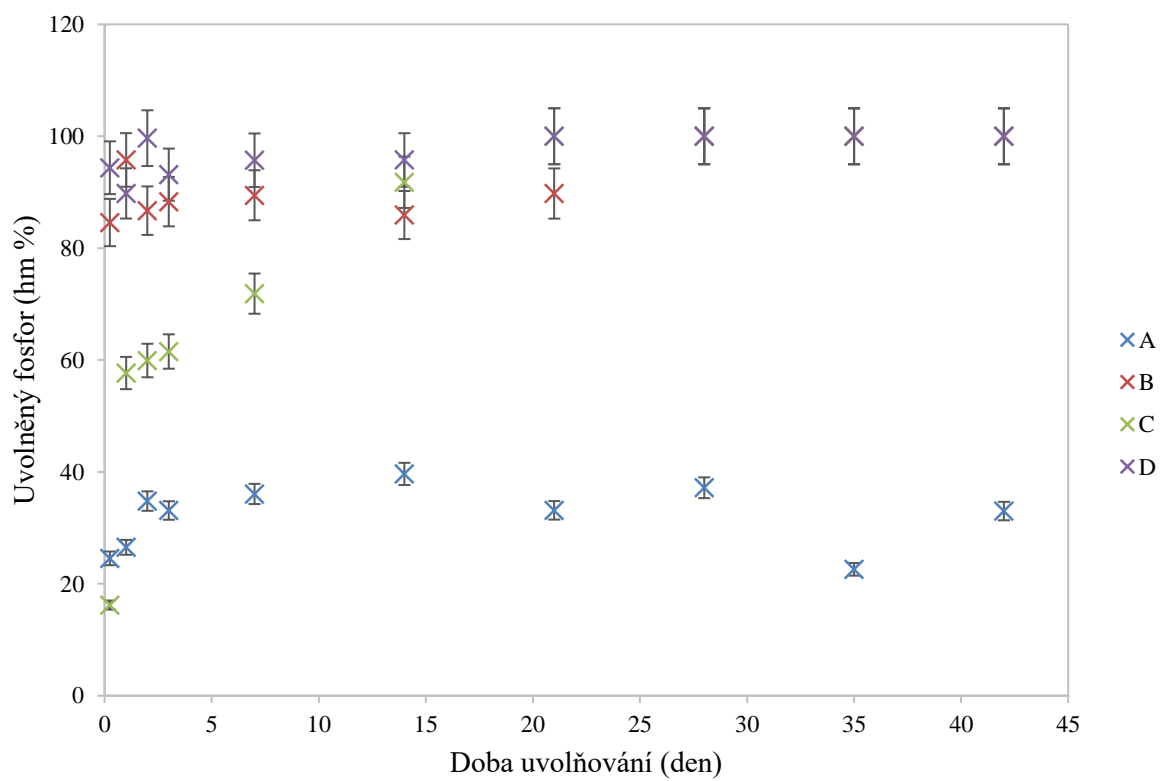
Obrázek 17. Závislost koncentrace uvolněného draslíku na době uvolňování



Obrázek 18. Závislost uvolněného draslíku v hm %



Obrázek 19. Závislost koncentrace uvolněného fosforu na době uvolňování

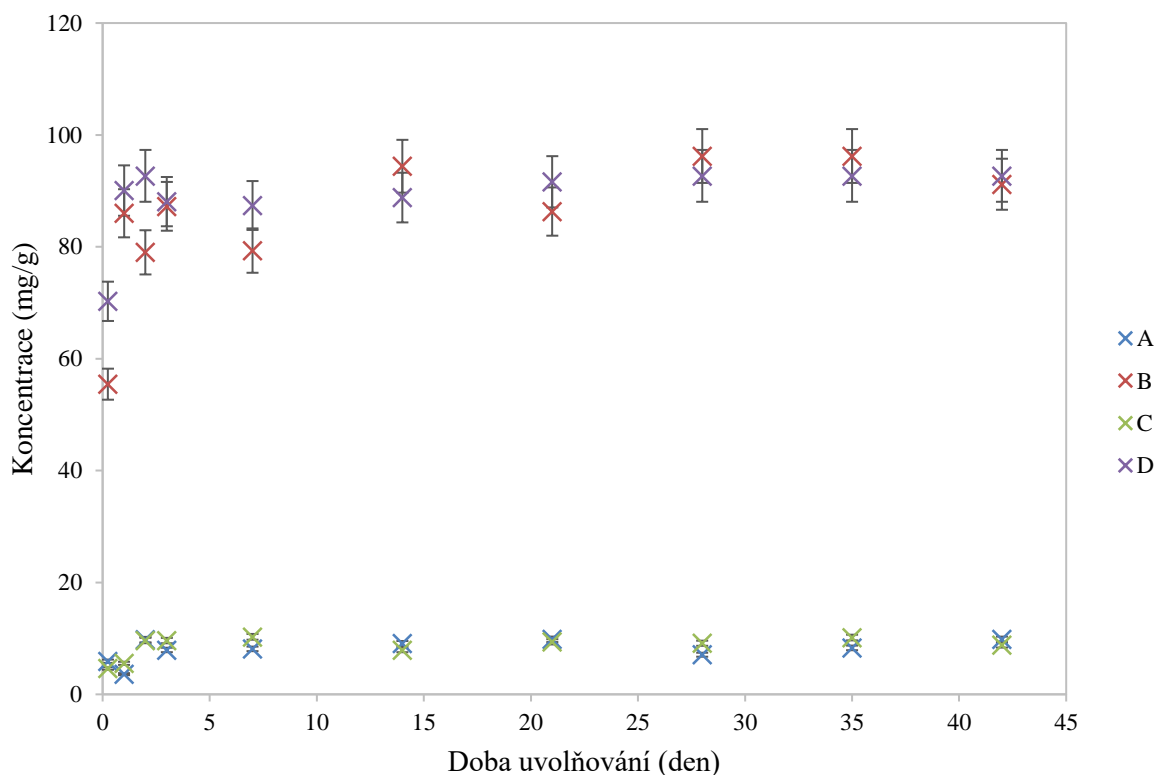


Obrázek 20. Závislost uvolněného fosforu v hm %

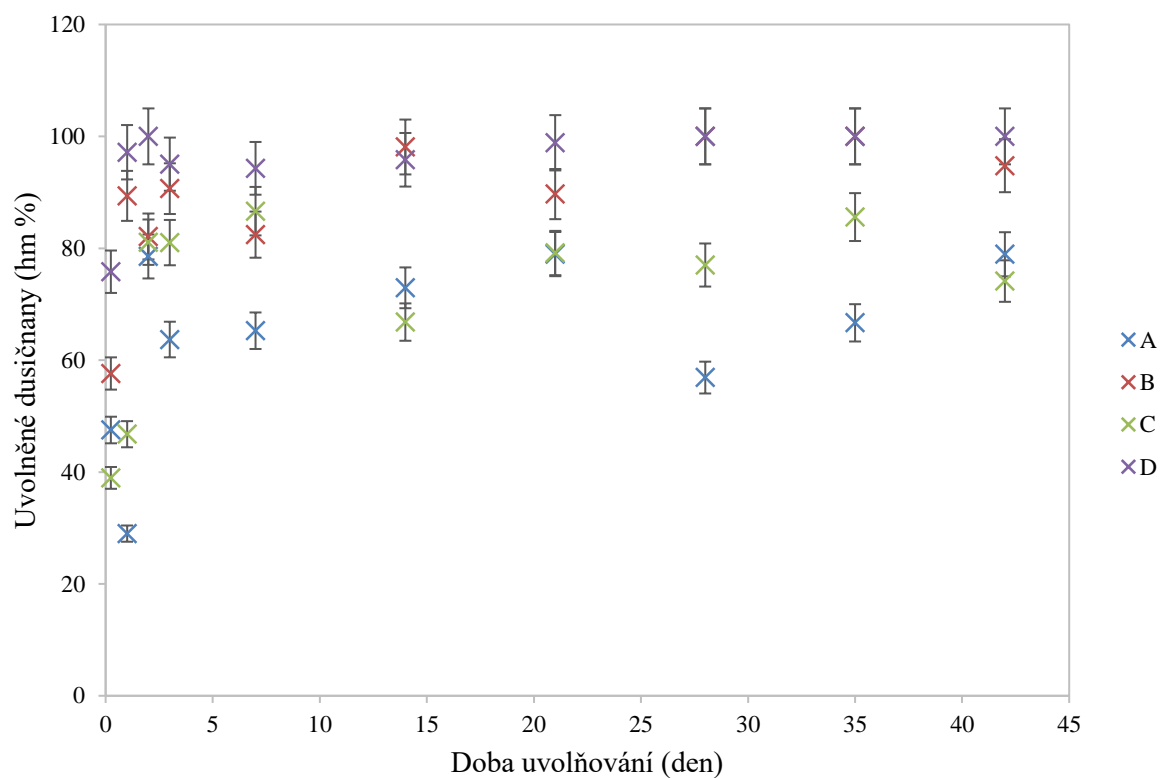
5.2.5 Iontová chromatografie

Pomocí iontové chromatografie byly stanoveny uvolněné dusičnany a fosforečnany. Největší množství dusičnanů bylo naměřeno u vzorků B a D, které obsahují nejvíce NPK. Zároveň došlo u těchto vzorků k uvolnění největšího podílu, tedy nejvíce hm % ze vzorku. Závislosti znázorňují Obrázek 21 a Obrázek 22. Pokud porovnáme vzorky A a C, tak u vzorku C došlo k uvolnění většího množství, než u vzorku A, přítomnost lignohumátu tedy podporuje uvolňování dusičnanů.

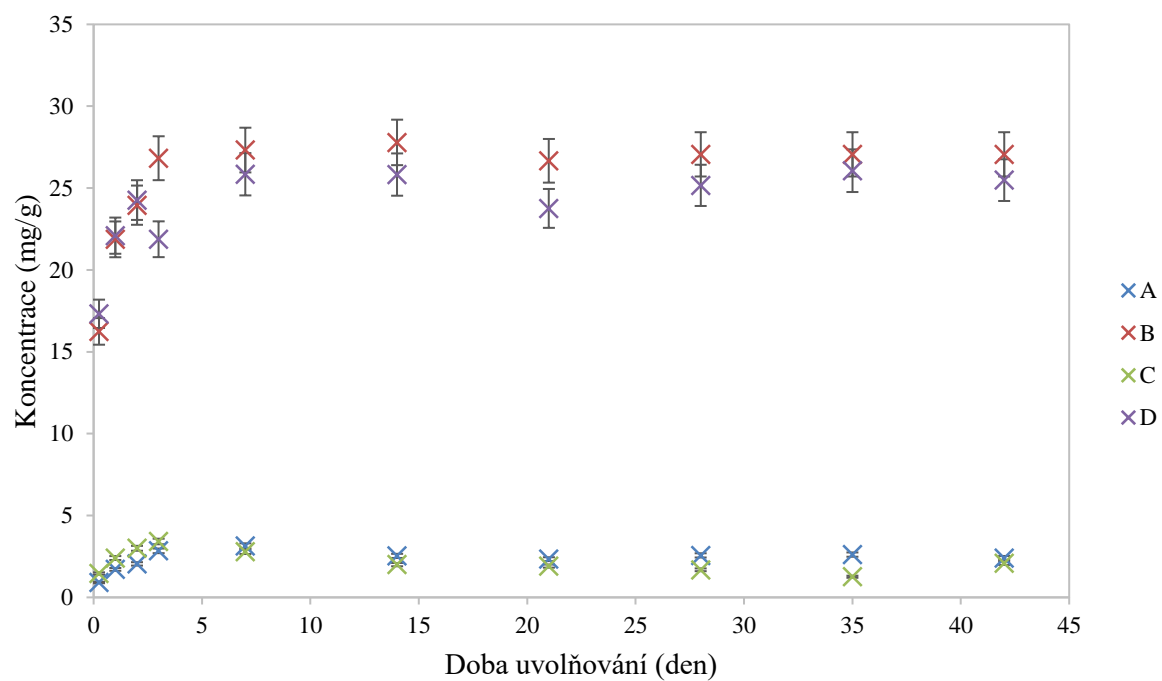
Jako v předchozích případech i při uvolňování fosforečnanů došlo k uvolnění největšího množství u vzorků B a D. Obrázek 23 znázorňuje závislost koncentrace uvolněných dusičnanů a Obrázek 24 znázorňuje uvolněné množství v hm %, i v tomto případě došlo k uvolnění největšího množství u vzorků B a D. Pokud znovu porovnáme i vzorky A a C, tak vyšší množství uvolněných fosforečnanů bylo u vzorku A, který lignohumát neobsahoval.



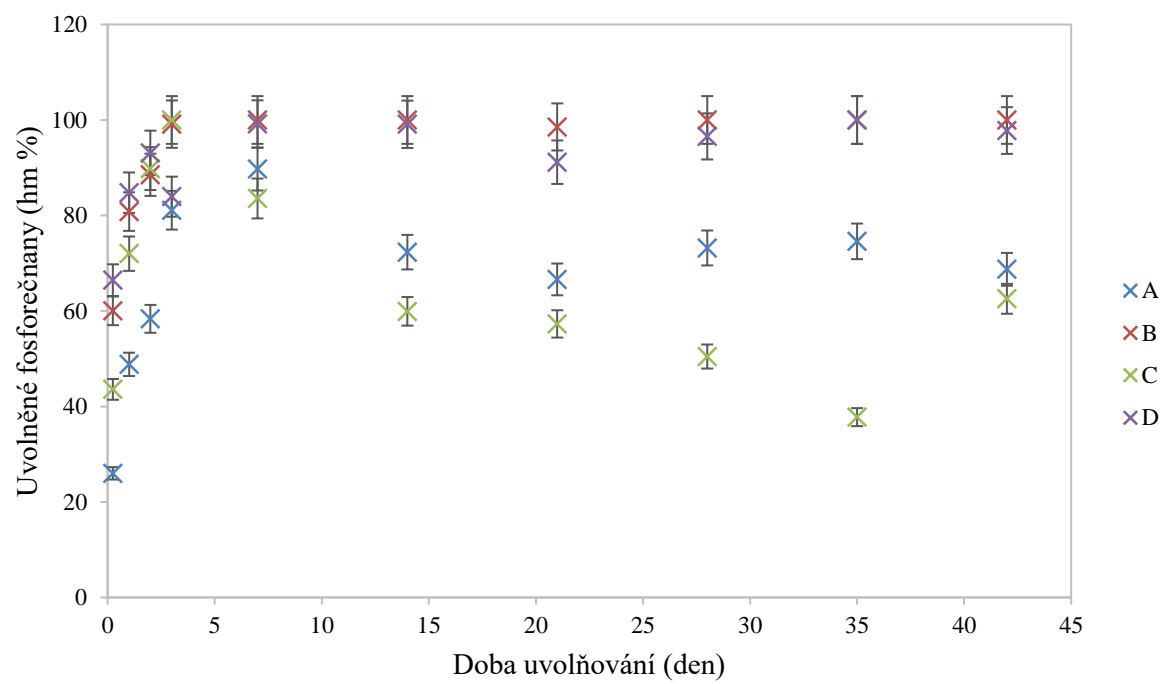
Obrázek 21. Závislost koncentrace uvolněných dusičnanů na době uvolňování



Obrázek 22. Uvolněné dusičnany v hm %



Obrázek 23. Závislost koncentrace uvolněných fosforečnanů na době uvolňování



Obrázek 24. Uvolněné fosforečnany v hm %

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo především seznámení se superabsorpčními polymery a následné studium jejich vlastností. Úkolem tedy bylo nejprve připravit tyto polymery a poté provést experimenty, které charakterizují schopnost pojmout vodu, tedy botnání a experimenty, které souvisejí s řízeným uvolňováním nutrientů.

V experimentální části bylo tedy nejprve připraveno 6 druhů SAP, které se liší obsahem NPK a lignohumátu. Ovšem již při přípravě nastaly problémy po přidání lignohumátu A. Proto byl tento lignohumát spolu s lignohumátem B podroben testování. Od obou vzorků byly připraveny roztoky a změřeno pH, UV–VIS, vodivost, elementární analýza a FT–IR. Veškeré experimenty ukázaly na vyšší kyselost lignohumátu A, z těchto důvodů byl pro přípravu SAP použit lignohumát B.

Při studiu botnání byly vzorky ponořeny do destilované vody a po určitých časových úsecích vážena hmotnost nabotnaného vzorku. Ukázalo se, že nejlepší botnací schopnost má hydrogel H, který obsahuje lignohumát, ale neobsahuje NPK, a také hydrogel C, který obsahuje lignohumát i NPK. Nejmenší botnací schopnost pak v porovnání s ostatními mají hydrogel D a hydrogel B, které obsahují stejné množství NPK, které je desetkrát větší, než je tomu u hydrogelu C. Vyšší množství NPK tedy snižuje botnací schopnost SAP.

Následovalo měření uvolňování iontů, kdy byly vzorky tentokrát ponořeny do MQ vody a ponechány po 6 týdnů. Výsledně tedy bylo připraveno 60 vzorků. Měření vodivosti prokázalo nejvíce uvolněných iontů u hydrogelů B a D, které obsahují vysoké množství NPK. Tedy je patrné, že sice přítomnost NPK snižuje botnací schopnost, ale zároveň zvyšuje vodivost a tím množství uvolněných iontů. Při měření pH bylo dosaženo podobných výsledků. Opět hydrogel B a D vykazují kyselejší charakter, tedy bylo uvolněno více oxoniových iontů do roztoku. Obecně tedy lze říci, že přítomnost NPK napomáhá uvolňování iontů.

Měření UV–VIS bylo provedeno pouze pro hydrogely C, D a H, které obsahovaly lignohumát. Nejvíce uvolněného lignohumátu bylo zjištěno u hydrogelu C, který obsahuje menší množství NPK, než obsahuje hydrogel D. Naopak nejméně uvolněného lignohumátu bylo u vzorku H, který NPK neobsahoval. Uvolněný lignohumát u vzorků C a D, co se týče procentuálního množství, které bylo ze vzorků uvolněno, byl poměrně vyrovnaný. Můžeme tedy předpokládat, že přítomnost NPK zvyšuje uvolňování lignohumátu.

Pomocí metody ICP–OES a iontové chromatografie byly změřeny uvolněné ionty. Konkrétně draslík a fosfor metodou ICP–OES a dusičnany a fosforečnany pomocí iontové chromatografie. Při těchto měřeních došlo k největšímu uvolnění jednotlivých iontů ze vzorků B a D, tedy vzorky, které obsahují desetinásobné množství NPK oproti vzorkům A a C. Zároveň bylo zjištěno, že přítomnost lignohumátu podporuje uvolňování draslíku, fosforu a dusičnanů, ale nepodporuje uvolňování fosforečnanů.

Experimentálně byl tedy průběh postupného uvolňování nutrientů, které jsou pro rostliny nezbytné. Můžeme tedy říci, že uplatnění těchto polymerů v zemědělství by bylo velmi výhodné.

7 SEZNAM LITERATURY

- [1] Co je co v povrchové a koloidní chemii [online]. 2005. Praha: VŠCHT Praha. Available at: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/motor/main.obsah.html
- [2] POUCHLÝ, Julius. 2008. *Fyzikální chemie makromolekulárních a koloidních soustav*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN: 978-80-7080-674-6
- [3] KVÍTEK, Libor and Aleš PANÁČEK. 2007. *Základy koloidní chemie*. 1. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN: 978-80-244-1669-4
- [4] Polyacrylates. 2014. *Polymer properties database* [online]. Chemical Retrieval on the Web. Available at: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyacrylate%20type.html>
- [5] Polyacrylate Basics. 2003. *The Macrogalleria* [online]. Hattiesburg: The University of Southern Mississippi. Available at: <https://pslc.ws/macrog/acrylate.htm>
- [6] BÍLEK, Martin and Pavel OPATRŇÝ. 2008. Superabsorpční polymery ve výuce chemie. *Biologie, chemie, zeměpis: časopis pro výuku přírodovědných předmětů na základních a středních školách*. **15**(3), 135-139.
- [7] ESTEVES, Luís Pedro. 2011. Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid. *Cement and Concrete Composites*. **33**(7), 717-724.
- [8] KIATKAMJORNWONG, Suda. 2007. Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites. *ScienceAsia*. **33**(1), 5.
- [9] ELLIOTT, Mark. Superabsorbent polymers. *Product development scientist for SAP. BASF Aktiengesellschaft ss*, 2004, 13.
- [10] RAJU, K. Mohana, M. Padmanabha RAJU and Y. Murali MOHAN. 2002. Synthesis and water absorbency of crosslinked superabsorbent polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. **85**(8), 1795-1801.
- [11] HÜTTERMANN, Aloys, Lawrence J. B. ORIKIRIZA and Hillary AGABA. 2009. Application of Superabsorbent Polymers for Improving the Ecological Chemistry of Degraded or Polluted Lands. *CLEAN - Soil, Air, Water*. **37**(7), 517-526.
- [12] EKEBAFE, L. O., D. E. OGGBEIFUN and F. E. OKIEIMEN. 2011. Polymer Applications in Agriculture. *Biokemistri*. **23**(2), 81-89.
- [13] SIMÕES, Susana. 2012. Modular Hydrogels for Drug Delivery. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*. **03**(02), 185-199.

- [14] SANNINO, A., A. ESPOSITO, A. De ROSA, A. COZZOLINO, L. AMBROSIO and L. NICOLAIS. 2003. Biomedical application of a superabsorbent hydrogel for body water elimination in the treatment of edemas. *Journal of Biomedical Materials Research*. **67A**(3), 1016-1024.
- [15] MEJLHEDE JENSEN, O. 2013. Use of Superabsorbent Polymers in Concrete. *Concrete International*. **35**(1), 48-52.
- [16] RASHIDZADEH, Azam and Ali OLAD. 2014. Slow-released NPK fertilizer encapsulated by NaAlg-g-poly(AA-co-AAm)/MMT superabsorbent nanocomposite. *Carbohydrate Polymers*. **114**, 269-278.
- [17] TYLISZCZAK, B., J. POLACZEK, J. PIELICHOWSKI and K. PIELICHOWSKI. 2009. Preparation and Properties of Biodegradable Slow-Release PAA Superabsorbent Matrixes for Phosphorus Fertilizers. *Macromolecular Symposia*. **279**(1), 236-242.
- [18] XIE, Lihua, Mingzhu LIU, Boli NI, Xu ZHANG and Yanfang WANG. 2011. Slow-release nitrogen and boron fertilizer from a functional superabsorbent formulation based on wheat straw and attapulgite. *Chemical Engineering Journal*. **167**(1), 342-348.
- [19] WU, Lan and Mingzhu LIU. 2008. Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention. *Carbohydrate Polymers*. **72**(2), 240-247.
- [20] NI, Boli, Mingzhu LIU and Shaoyu LÜ. 2009. Multifunctional slow-release urea fertilizer from ethylcellulose and superabsorbent coated formulations. *Chemical Engineering Journal*. **155**(3), 892-898.
- [21] ZHENG, Tong, Yuhai LIANG, Shihuo YE and Zhongyi HE. 2009. Superabsorbent hydrogels as carriers for the controlled-release of urea: Experiments and a mathematical model describing the release rate. *Biosystems Engineering*. **102**(1), 44-50.
- [22] GAO, Lijuan, Shiqiang WANG and Xuefei ZHAO. 2013. Synthesis and characterization of agricultural controllable humic acid superabsorbent. *Journal of Environmental Sciences*. **25**(1), S69-S76.
- [23] NI, Boli, Mingzhu LIU, Shaoyu LÜ, Lihua XIE and Yanfang WANG. 2010. Multifunctional Slow-Release Organic-Inorganic Compound Fertilizer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **58**(23), 12373-12378.
- [24] TRENKEL, Martin. 1997. *Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture*. 1. Paris: International Fertilizer Industry Association.

- [25] TRENKEL, M. E. 2010. *Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers*. 1. Paris: International Fertilizer Industry Association.
- [26] TRINH, Thanh H. and KuZilati KUSHAARI. 2016. Dynamic of Water Absorption in Controlled Release Fertilizer and its Relationship with the Release of Nutrient. *Procedia Engineering*. **148**, 319-326.
- [27] Fertilizer Numbers – What Is NPK. 2018. *Gardening know how* [online]. Bedford: Gardening know how. Available at: <https://www.gardeningknowhow.com/garden-how-to/soil-fertilizers/fertilizer-numbers-npk.htm>
- [28] CARLSON, Carrie and Shane LE CAPITAINE. NPK Fertilizer: What Is It And How Does It Work?. *FEECO International* [online]. FEECO International. Available at: <https://feeco.com/npk-fertilizer-what-is-it-and-how-does-it-work/>
- [29] RAW NITROGEN: growth. *NPK Industries* [online]. Medford: NPK Industries. Available at: <http://npk-industries.com/nitrogen.html>
- [30] Adenosine Triphosphate. 2004. *Pubchem* [online]. Bethesda: Pubchem. Available at: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Adenosine_triphosphate#section=Top
- [31] Iron For Plants: Why Do Plants Need Iron?. 2018. *Gardening know how* [online]. Bedford: Gardening know how. Available at: <https://www.gardeningknowhow.com/garden-how-to/soil-fertilizers/iron-for-plants.htm>
- [32] WHITE, P. J. 2003. Calcium in Plants. *Annals of Botany*. **92**(4), 487-511.
- [33] What's the Function of Calcium (Ca) in Plants?. 2017. *Greenway Biotech, Inc.* [online]. Santa Fe Springs: Greenway Biotech. Available at: <https://www.greenwaybiotech.com/blogs/news/whats-the-function-of-calcium-ca-in-plants>
- [34] Huminové látky. 2015. *AGROPRESS.CZ* [online]. Praha: FARMCZSYSTEM s.r.o. Available at: <http://www.agropress.cz/huminove-latky/>
- [35] Co jsou to huminové látky. *Amagro humic substances* [online]. Amagro. Available at: <https://www.amagro.com/co-jsou-to-huminove-latky.html>
- [36] Huminové látky. *Humatex* [online]. Bílina: Humatex. Available at: <http://www.humatex.cz/cs/obecne-informace/huminove-latky>
- [37] The Top 5 Benefits of Humic Acid. *The premium source for humic acids based products* [online]. Dallas: EARTHGREEN. Available at: <http://www.earthgreen.com/benefitsofhumicacid/>

- [38] LOFFREDO, Elisabetta and Nicola SENESI. 2006. THE ROLE OF HUMIC SUBSTANCES IN THE FATE OF ANTHROPOGENIC ORGANIC POLLUTANTS IN SOIL WITH EMPHASIS ON ENDOCRINE DISRUPTOR COMPOUNDS. *Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation*. Dordrecht: Springer Netherlands, **69**, 69-92. NATO Science Series.
- [39] MO, Chu, Zhu SHU-QUAN, Li HUA-MIN, Huang ZHAN-BIN and Li SHU-QIN. 2006. Synthesis of poly(acrylic acid)/sodium humate superabsorbent composite for agricultural use. *Journal of Applied Polymer Science*. **102**(6), 5137-5143.
- [40] MOHANA RAJU, K and M PADMANABHA RAJU. 2001. Synthesis of novel superabsorbing copolymers for agricultural and horticultural applications. *Polymer International*. **50**(8), 946-951.
- [41] HÜTTERMANN, Aloys, Lawrence J. B. ORIKIRIZA and Hillary AGABA. 2009. Application of Superabsorbent Polymers for Improving the Ecological Chemistry of Degraded or Polluted Lands. *CLEAN - Soil, Air, Water*. **37**(7), 517-526.
- [42] DEMITRI, C., F. SCALERA, M. MADAGHIELE, A. SANNINO and A. MAFFEZZOLI. 2013. Potential of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels as Water Reservoir in Agriculture. *International Journal of Polymer Science*. **2013**, 1-6.
- [43] PUOCI, Francesco, Francesca IEMMA, Umile Gianfranco SPIZZIRRI, Giuseppe CIRILLO, Manuela CURCIO and Nevio PICCI. Polymer in Agriculture: a Review. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. **3**(1), 299-314.
- [44] CHEN, Peng, Wei'An ZHANG, Wei LUO and Yue'e FANG. 2004. Synthesis of superabsorbent polymers by irradiation and their applications in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*. **93**(4), 1748-1755.
- [45] LIANG, Rui, Mingzhu LIU and Lan WU. 2007. Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention. *Reactive and Functional Polymers*. **67**(9), 769-779.
- [46] WU, Lan, Mingzhu LIU and RUI LIANG. 2008. Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Bioresource Technology*. **99**(3), 547-554.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| <i>Zkratka</i> | <i>Význam zkratky</i> |
|----------------|--|
| SAP | Superabsorpční polymery |
| NPK | Dusík–fosfor–draslík |
| MQ | Superčistá voda |
| FT–IR | Infračervená spektrometrie |
| ICP–OES | Atomová optická spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem |
| IC | Iontová chromatografie |
| KPS | Peroxydisíran draselný |
| MBA | Methylen–bis–akrylamid |
| LH A | Lignohumát A |
| LH B | Lignohumát B |
| EGDMA | ethylenglykol dimethakrylát |
| APS | Peroxydisíran amonný |
| DP | diallylftalát |
| PEG | Polyethylenglykol |
| KOH | Hydroxid draselný |
| NaCl | Chlorid sodný |
| m_t | hmotnost bobtnajícího gelu v čase t od počátku botnutí |
| m_0 | počáteční hmotnost xerogelu |
| ρ | hustota kapaliny |
| ΔV | objem pohlčené kapaliny |